

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**Energy Harvesting: Una técnica para generar energía**

**Álvaro Fernández Ramos  
Tutor: Javier Garrido Salas**

**Julio 2017**



# **Energy Harvesting: Una técnica para generar energía**

**AUTOR: Álvaro Fernández Ramos**

**TUTOR: Javier Garrido Salas**



**HCTLab**

**Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones**

**Escuela Politécnica Superior**

**Universidad Autónoma de Madrid**

**Julio de 2017**





# Resumen

Debido a la necesidad actual de poder aumentar la vida útil de las baterías empleadas en dispositivos electrónicos o incluso de poder llegar a sistemas electrónicos autosuficientes que eliminen el uso de estas, el campo del *energy harvesting* está experimentando una gran evolución. En este Trabajo Fin de Grado se presenta un estudio del marco teórico y la realización de un caso práctico sobre el *piezoelectric energy harvesting*, una de las tecnologías involucradas en el concepto de *energy harvesting*. Durante el estudio del marco teórico se detallará la importancia de esta tecnología en nuestro día a día, y se describirán los conceptos teóricos principales involucrados, relacionando estos con la puesta en práctica de un sistema experimental donde se pueda observar y sacar conclusiones sobre el fenómeno piezoeléctrico y las soluciones tecnológicas a las que se pueden llegar a partir de él. Para ello se desarrollará un sistema capaz de generar vibraciones de distintas amplitudes y frecuencias que excite un modelo comercial de un transductor piezoeléctrico, cuya señal resultante será tratada por un modelo comercial de un circuito acondicionador de señal para poder alimentar un diodo LED con el objetivo de observar la generación de energía eléctrica a partir de una excitación mecánica, todo esto mientras se analizan las señales eléctricas resultantes y se realiza una comparación con el modelo teórico. Una vez finalizado el estudio se detallarán las conclusiones que se pueden obtener a partir de él y los diferentes aspectos que puedan mejorar el análisis de los resultados obtenidos.

# Abstract

Due to the current need to increase the useful life of batteries used in electronic devices or even to reach self-sufficient electronic systems to remove the use of these ones, the field of energy harvesting is undergoing a great evolution. This Bachelor Thesis presents a study of the theoretical framework and the realization of a practical case about piezoelectric energy harvesting, one of the technologies involved in the concept of energy harvesting. During the study of the theoretical framework it will be detailed the importance of this technology in our day to day, and it will be described the main theoretical concepts involved, relating these to the implementation of an experimental system where it can be observed and draw conclusions about the piezoelectric phenomenon and the technological solutions that can be achieved from it. In order to accomplish this, a system capable of generating vibrations of different amplitudes and frequencies will be developed to excite a commercial model a piezoelectric transducer, whose resulting signal will be treated by a commercial model of a signal conditioning circuit for the purpose of feeding a LED diode, with the aim of observe the generation of electrical energy from a mechanical excitation, while analyzing the resulting electrical signals comparing the results to the theoretical model. Once the study is finished, the conclusions that can be derived from it and the different aspects that could improve the analysis of the results obtained will be detailed.

## **Palabras clave**

Recolección de energía, recolección de energía piezoeléctrica, piezoelectricidad, transductor piezoeléctrico, vibración, puente rectificador, regulador Buck.

## **Keywords**

Energy harvesting, piezoelectric energy harvesting, piezoelectricity, piezoelectric transducer, vibration, bridge rectifier, Buck converter.

## ***Agradecimientos***

*En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor Javier Garrido la oportunidad de permitirme desarrollar este proyecto, su paciencia conmigo, su disponibilidad a la hora de resolver cualquier duda y todos los consejos que me ha brindado. También me gustaría agradecer a todos los miembros del HCTLab su amabilidad y ayuda a la hora de realizar este proyecto.*

*En segundo lugar, a cada uno de los compañeros en la carrera con los que he entablado una buena relación de amistad, por compartir infinidad de buenos momentos dentro y fuera de la universidad y por ayudarnos en los no tan buenos para seguir adelante.*

*No me olvido de mis otros amigos, los que siempre estuvieron y los que he ido conociendo a lo largo de estos años fuera de las paredes de esta escuela que ha sido como mi segunda casa. Agradecerles todo el apoyo que me han brindado y por animarme cuando las cosas no fueron bien.*

*Por último, a cada uno de los muchos miembros de mi familia que durante estos años se han preocupado siempre por mis estudios y por creer en mí cuando a veces ni yo mismo lo hacía.*

*Muchas gracias,*

*Álvaro Fernández Ramos  
Julio 2017*





# INDICE DE CONTENIDOS

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Organización de la memoria .....	2
<b>2. Estado del arte .....</b>	<b>3</b>
2.1 Concepto de Energy Harvesting .....	3
2.2 Principio de transducción piezoeléctrica .....	4
2.2.1 Ecuaciones constitutivas de la piezoelectricidad .....	4
2.2.1 Modelos de conversión mecánica-eléctrica .....	5
2.3 Modos de operación .....	6
2.2.1 Modo de operación d31 .....	6
2.4 Circuitería de acondicionamiento .....	8
2.5 Literatura hasta la fecha en el campo de los PEHs .....	8
2.5.1 PEHs desde macroescala a escala milimétrica .....	8
2.5.2 PEHs escala MEMS y escala nanométrica .....	9
<b>3. Diseño .....</b>	<b>11</b>
3.1 Estructura generadora de vibraciones .....	11
3.2 Piezoelectric Energy Harvester .....	12
3.3 Circuito acondicionador de señal .....	13
3.3.1 Principio de operación del Demo Circuit 1459B-A .....	16
3.4 Circuito completo del sistema experimental .....	17
<b>4. Desarrollo .....</b>	<b>19</b>
4.1 Construcción de la estructura vibratoria .....	20
4.1.1 Construcción de las piezas del eje de revolución .....	22
4.2 Preparación del PEH .....	22
4.3 Integración de los elementos del sistema experimental .....	23
4.3.1 Sujeción del Mide Vulture 22B con la estructura vibratoria .....	23
4.3.2 Conexión del Mide Vulture 22B con el Demo Circuit 1459B-A .....	24
4.4 Desarrollo de la integración completa del sistema .....	25
<b>5. Integración, pruebas y resultados .....</b>	<b>29</b>
<b>6. Conclusiones y trabajo futuro .....</b>	<b>38</b>
6.1 Conclusiones .....	38
6.2 Trabajo futuro .....	39
<b>Referencias .....</b>	<b>41</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>43</b>



# INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: JERARQUÍA DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA.....	3
FIGURA 2-2: ESTRUCTURA DE UN MONOCRISTAL Y UN POLICRISTAL.....	4
FIGURA 2-3: MODELO EQUIVALENTE DE LOS PEH Y SU COMPORTAMIENTO RESONANTE.....	5
FIGURA 2-4: REPRESENTACIÓN DEL MODO DE OPERACIÓN D31.....	7
FIGURA 2-5: REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE VIGA VOLADIZA.....	7
FIGURA 2-6: DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO ESTÁNDAR.....	8
FIGURA 3-1: COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	11
FIGURA 3-2: MODELO COMERCIAL DEL GENERADOR DE VIBRACIONES.....	11
FIGURA 3-3: MIDE VOLTURE 22B PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER.....	12
FIGURA 3-4: TECNOLOGÍA DE EMPAQUETAMIENTO PATENTADA POR MIDE.....	13
FIGURA 3-5: REPRESENTACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN SERIE Y PARALELO DEL MIDE VOLTURE 22B .....	13
FIGURA 3-6: RELACIÓN ENTRE LA MASA EXTRA AÑADIDA Y LA FRECUENCIA DE RESONANCIA.....	13
FIGURA 3-7: DIAGRAMA DEL LT DEMO CIRCUIT 1459B-A.....	14
FIGURA 3-8: DISEÑO DE LA PLACA DEL DEMO CIRCUIT 1459B-A.....	15
FIGURA 3-9: CONFIGURACIÓN DE LOS PINES DEL DEMO CIRCUIT 1459B-A.....	15
FIGURA 3-10: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LTC3588-1.....	16
FIGURA 3-11: DIAGRAMA DEL CIRCUITO COMPLETO.....	18
FIGURA 4-1: COMPONENTES EMPLEADOS PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	19
FIGURA 4-2: CORTES EN LA VIGA DE MADERA.....	20
FIGURA 4-3: MOTOR DC CON LOS CABLES SOLDADOS.....	21
FIGURA 4-4: MOTOR DC ENCAJADO EN LA VIGA DE MADERA.....	21
FIGURA 4-5: FUENTE DE ALIMENTACION VARIABLE AGILENT U8032A.....	21
FIGURA 4-6: PIEZAS PARA GENERAR DISTINTAS AMPLITUDES DE VIBRACIÓN.....	22

FIGURA 4-7: PUENTE ENTRE EL PIN 1 Y 3 DEL MIDE VOLTURE 22B.....	23
FIGURA 4-8: PUENTE ENTRE EL PIN2 Y 2 DEL MIDE VOLTURE 22B.....	23
FIGURA 4-9: ABRAZADERA DE SUJECCIÓN DEL MIDE VOLTURE 22B.....	24
FIGURA 4-10: CONEXIÓN DEL LED Y MIDE VOLTURE 22B CON EL DEMO CIRCUIT 1459B-A...	25
FIGURA 4-11: ESTRUCTURA VIBRATORIA SITUADA EN UNA MESA.....	25
FIGURA 4-12: SUJECCIÓN DE LA ESTRUCTURA VIBRATORIA CON LA MORDAZA DE PRESIÓN.....	26
FIGURA 4-13: SUJECCIÓN DE LA ERSTRUCTURA VIBRATORIA CON LA GOMA.....	27
FIGURA 4-14: ESTRUCTURA FINAL DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	28
FIGURA 5-1: OSCILOSCOPIO DIGITAL AGILENT INFINIIVISION .....	29
FIGURA 5-2: LIMITACIÓN DEL PEH CON LOS CLAVOS .....	29
FIGURA 5-3: SEÑAL A TRAVÉS DE PZ1 Y PZ2, VIN Y GND, VOUT Y GND.....	30
FIGURA 5-4: PARPADEO DEL DIODO LED.....	31
FIGURA 5-5: CERA DE ABEJA SUJETA AL MIDE VOLTURE 22B.....	34
FIGURA 5-6: FRECUENCIA DE RESONANCIA CON LA CERA DE ABEJA SUJETA AL MIDE VOLTURE 22B.....	34
FIGURA 5-7: SEÑAL DE SALIDA DEL MIDE VOLTURE 22B.....	37

## INDICE DE TABLAS

FIGURA 4-1: LISTADO DE COMPONENTES UTILIZADOS.....	19
FIGURA 5-1: MEDIDAS CON PIEZA N°1.....	32
FIGURA 5-2: MEDIDAS CON PIEZA N°2.....	32
FIGURA 5-3: MEDIDAS CON PIEZA N°3.....	33
FIGURA 5-4: MEDIDAS CON PIEZA N°1 Y MASA.....	35
FIGURA 5-5: MEDIDAS CON PIEZA N°2 Y MASA.....	35
FIGURA 5-6: MEDIDAS CON PIEZA N°3 Y MASA.....	36



# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

En la actualidad existe una tendencia global de aumentar cada vez más la cantidad de información extraída de equipamientos, construcciones, del medio ambiente... lo que nos permite interactuar con nuestro entorno, predecir ciertos acontecimientos o entender mejor ciertos fenómenos. Muchos sectores se encuentran involucrados en esta tendencia, tales como el automovilístico, el aeroespacial, el industrial y la construcción. Para poder seguir con esa tendencia global, es necesario implementar muchos más sensores, hecho que se antoja difícil debido a las soluciones actuales.

Entre las limitaciones actuales de los sensores destaca el hecho de que los cables se están convirtiendo cada vez más en algo más costoso y difícil de implementar en ciertos diseños (dentro de las paredes, en partes giratorias, etc...), y la limitada autonomía de los dispositivos electrónicos portátiles que implica el reemplazo de sus baterías, que en el caso de las *Wireless Sensor Networks* donde los sensores puedan ubicarse en lugares remotos o inaccesibles es una carga que implica costes elevados para las grandes fábricas que disponen de cientos de miles de sensores.

Es por ello que el campo del *energy harvesting* está experimentando una gran evolución, y como resultado se espera que las aplicaciones del EH aumenten la vida útil o incluso conduzcan a sistemas electrónicos autosuficientes eliminando completamente la necesidad del uso de baterías, lo que supondría un impulso importante en el crecimiento de la investigación en las industrias y en el mundo académico.

Existen varias fuentes de energía disponibles en el medio ambiente para su recolección, incluyendo la energía solar, las vibraciones, la radiofrecuencia y las térmicas, siendo la solar la que aporta una mayor densidad de potencia. Las vibraciones ambientales también aportan una gran densidad de energía por unidad de volumen, y al contrario de la energía solar, pueden operar en sistemas implantados o embebidos.

Existen tres tipos principales de recolectores de energía basados en vibraciones ambientales: piezoeléctricos, electromagnéticos y electroestáticos. Es sabido que los *Piezoelectric Energy Harvesters* ofrecen una mayor densidad de energía, además de tener arquitecturas más simples y escalables.

Por tanto, este TFG se centrará en el estudio de la tecnología involucrada en los PEHs y en la realización a nivel práctico de uno de los desarrollos ya implementados en la literatura del campo de los PEHs.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado radica en adquirir un conocimiento medio en el campo del *Piezoelectric Energy Harvesting*.

Para ello, en primer lugar, se hará un breve repaso del concepto de *energy harvesting* y más en detalle del *Piezoelectric Energy Harvesting*, realizando un estudio del marco teórico de las tecnologías involucradas en el campo de los transductores piezoeléctricos, de los conceptos principales involucrados en el campo y de la literatura desarrollada en el sector hasta la fecha.

En segundo lugar, con el objetivo de aplicar y afianzar los conocimientos teóricos se desarrollará un sistema experimental práctico. Este sistema experimental está primeramente formado por una estructura desarrollada para generar vibraciones de distinta amplitud y frecuencia, con el objetivo de poder observar y analizar el efecto que se obtiene al recoger estas vibraciones con los 2 elementos siguientes del sistema experimental, un modelo comercial de un transductor piezoeléctrico y un modelo comercial de una placa de evaluación que contiene una fuente de alimentación y un circuito acondicionador de la señal que proviene del transductor piezoeléctrico. De este modo se podrá hacer una comparación con el modelo teórico y comprobar el proceso de transformación de la energía mecánica producida por las vibraciones en energía eléctrica que pueda ser aprovechable por un dispositivo microelectrónico.

### **1.3 Organización de la memoria**

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- En el capítulo 1 se introduce una motivación en la que se refleja la importancia del concepto de *energy harvesting* y de la necesidad de su desarrollo. También se definen los objetivos que se pretenden cumplir con la realización de este TFG.
- Como continuación, en el capítulo 2 se introducirá el concepto de *energy harvesting* y se desarrollará un breve resumen de los fundamentos teóricos involucrados en la transformación de la energía que proviene de excitaciones mecánicas en energía eléctrica aprovechable a través de materiales piezoeléctricos. A su vez, al final del capítulo, se desarrolla una síntesis de la literatura desarrollada en el campo hasta la fecha.
- El capítulo 3 hace referencia al diseño y estructura del sistema experimental desarrollado en este TFG para observar el fenómeno piezoeléctrico y comprender la problemática de la tecnología involucrada. Se detallará información sobre cada uno de los elementos involucrados en el sistema desarrollado.
- El capítulo 4 describe cómo se ha llevado a cabo el proceso de construcción y desarrollo del sistema experimental empleado.
- El capítulo 5 detalla todas las pruebas realizadas con el sistema experimental y analiza los resultados obtenidos comparándolos con el modelo teórico.
- En el capítulo 6 se comentan las conclusiones finales obtenidas y se proponen futuras líneas de trabajo en el campo de los PEH.



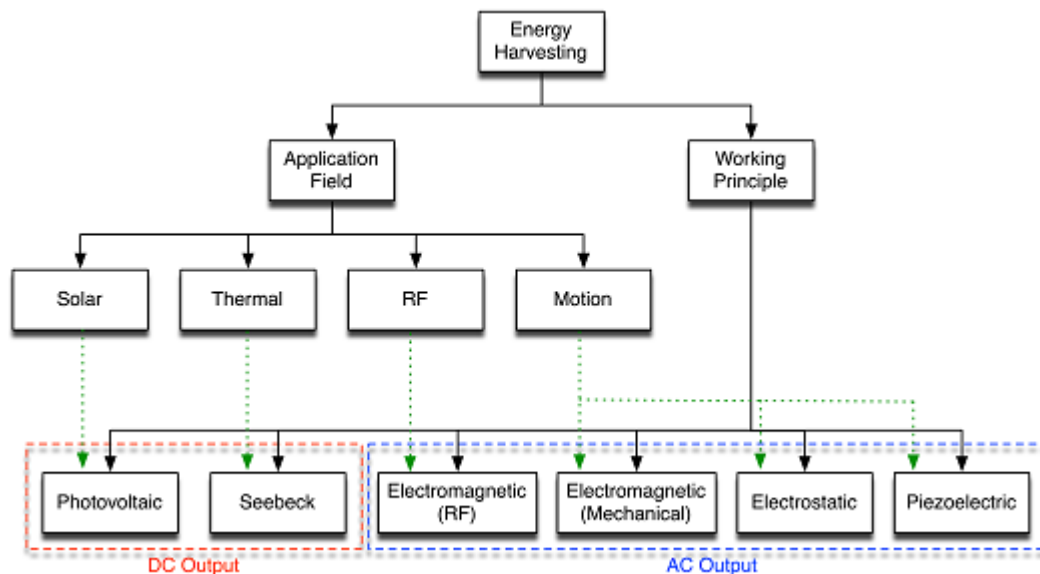
## 2 Estado del arte

### 2.1 Concepto de Energy Harvesting

En la actualidad, la cantidad de energía obtenida de combustibles fósiles como de fuentes alternativas resulta ser básica e imprescindible para nuestro día a día. Pero no son las únicas formas de energía, dado que además de estas fuentes en nuestro entorno también se genera energía de fuentes energéticas a pequeña escala, que con la correcta tecnología pueden aprovecharse para distintas aplicaciones. Es por ello que en los últimos años se ha desarrollado el concepto de recolección de energía ambiental (*energy harvesting*).

El término *energy harvesting* hace referencia al proceso por el cual la energía residual presente en el ambiente se aprovecha para producir energía eléctrica que puede ser almacenada o utilizada para alimentar pequeños dispositivos electrónicos de bajo consumo, como los utilizados en ordenadores y en las WSN. Por tanto, se aprovechan los distintos tipos de energía presentes en el medio ambiente para alimentar sistemas que puedan ser autosuficientes e inalámbricos.

Las principales tecnologías de recolección de energía se pueden clasificar según la jerarquía mostrada en la **Figura 2-1**. Figura extraída de la ref.[1]. No obstante, este TFG se centra en el estudio de un sistema experimental para la recolección de energía a través del fenómeno piezoeléctrico.



**Figura 2-1: Jerarquía de las principales tecnologías de recolección de energía [1]**

Entre las técnicas de recolección disponibles basadas en movimiento, la transducción piezoeléctrica ofrece mayores densidades de energía en comparación con la transducción electrostática y electromagnética, además su arquitectura es más simple y escalable.

## 2.2 Principio de Transducción Piezoeléctrica

Los materiales piezoeléctricos tienen la propiedad de convertir una tensión mecánica aplicada en ellos en energía eléctrica, lo que se denomina como efecto piezoeléctrico directo. A su vez, de forma contraria, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico, fenómeno denominado como efecto piezoeléctrico inverso.

El fenómeno piezoeléctrico se basa en la estructura fundamental de una red cristalina. Ciertas estructuras cristalinas tienen un balance de carga con polarización positiva y negativa, que se neutralizan a lo largo del eje polar imaginario. Cuando este balance de carga es perturbado con un estrés externo sobre la malla cristalina, la energía es transferida por portadores de carga eléctrica creando una corriente en el cristal, induciendo un campo eléctrico (efecto piezoeléctrico directo). A la inversa, cuando se le aplica una diferencia de potencial, esta creará un desequilibrio en el estado de carga neutral causando un estrés mecánico (efecto piezoeléctrico inverso).

Existe una estrecha relación entre el efecto piezoeléctrico y la simetría de una red cristalina, dado que solo se puede observar el efecto piezoeléctrico en cristales que carezcan de simetría. Dicha relación se puede detallar con las estructuras basadas en monocristales y policristales.

En un monocristal [1], los ejes polares de todos los portadores de carga exhiben características direccionales de un solo sentido. Estos cristales demuestran simetría, donde los ejes polares en todo el cristal permanecerían unidireccionales incluso si se dividiera en pedazos.

Por el contrario, un policristal [1], se caracteriza por tener diferentes regiones dentro del material con diferentes ejes polares. Es asimétrico debido a que no hay ningún punto donde el cristal pueda ser cortado y que dejara dos piezas restantes con los mismos ejes polares resultantes.

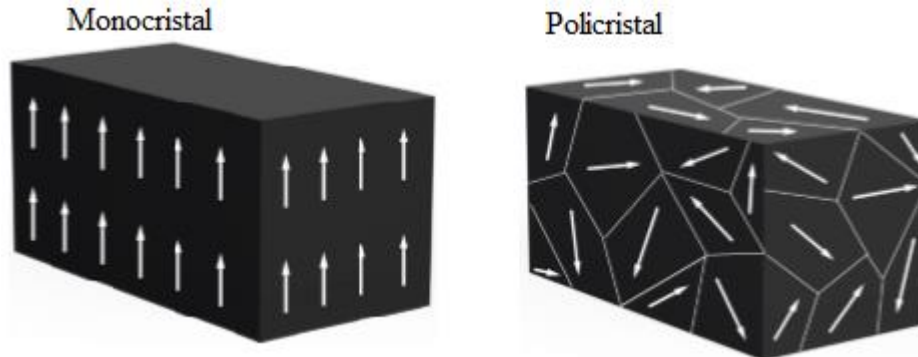


Figura 2-2: Estructura de un monocristal y un policristal [1]

### 2.2.1 Ecuaciones constitutivas de la piezoelectricidad

Como se ha introducido anteriormente, el efecto piezoeléctrico puede ser directo (comportamiento de sensor) e inverso (comportamiento de actuador). Ambos constan de ecuaciones constitutivas que describen las propiedades electromecánicas de los materiales piezoeléctricos. No obstante, en este TFG se hará uso del efecto piezoeléctrico directo, descrito por la siguiente ecuación constitutiva:

$$D_i = d_{ij}T_j + \varepsilon_{ik}^T E_k, [2]$$

donde  $D$  representa el desplazamiento eléctrico o densidad de flujo eléctrico,  $d$  el coeficiente de estrés piezoeléctrico,  $T$  el estrés,  $\varepsilon$  la constante dieléctrica y  $E$  el campo eléctrico.

El primer término de la ecuación indica que la carga total generada en un material piezoeléctrico es proporcional al estrés aplicado, por tanto, los PEHs son diseñados para maximizar el estrés bajo una cierta carga mecánica.

Los subíndices de la ecuación se refieren a las distintas direcciones dentro del sistema de coordenadas del material y el superíndice “T” indica que las constantes dieléctricas son medidas bajo el efecto de un estrés constante. Los subíndices “i” y “k” indican el eje de coordenadas, con una notación del 1 al 3, que corresponden con los ejes “x”, “y” y “z” respectivamente. A su vez, el subíndice “j” se denota con números del 1 al 6, siendo los tres primeros correspondientes a los ejes cartesianos y los tres últimos números correspondiendo a cortes en el eje respectivo, indicando movimientos de rotación sobre estos. Estos índices también sirven para definir los denominados *modos de operación*, es decir, las direcciones esperadas de la tensión mecánica de excitación y campo eléctrico resultante de un dispositivo piezoeléctrico, los cuales se verán detallados más adelante explicando el modo de operación del sistema experimental tratado en este TFG.

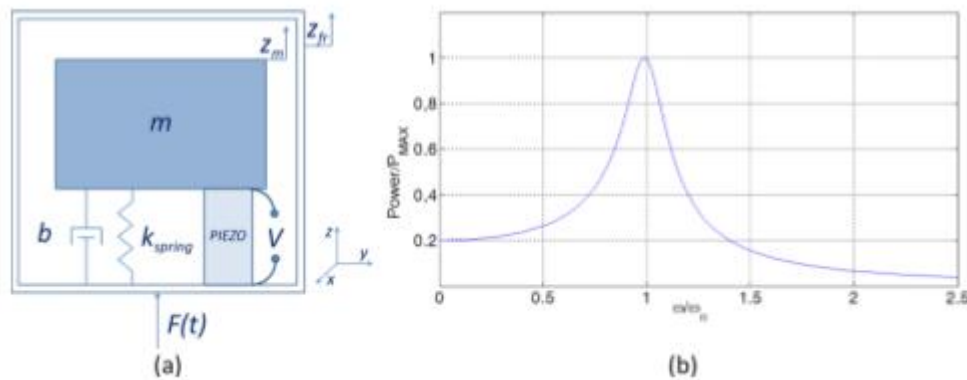
### 2.2.2 Modelos de conversión mecánica-eléctrica

El concepto de generar energía eléctrica a partir de la energía mecánica de las vibraciones es en realidad un proceso de conversión realizado en dos pasos.

En primer lugar, las vibraciones se convierten en un movimiento relativo entre dos elementos, gracias a los llamados dispositivos resonantes, que se pueden describir como un sistema masa-amortiguador de segundo orden donde el elemento piezoeléctrico iría colocado en paralelo al amortiguador, y en segundo lugar se convierte en energía eléctrica mediante el material piezoeléctrico.

El uso de estos sistemas masa-amortiguador genera un fenómeno de resonancia, ampliando la amplitud de movimiento relativa de la masa comparada a la amplitud de las vibraciones, aumentando la cantidad de energía cosechada.

La **Figura 2-3**, figura extraída de la ref. [1], representa el modelo equivalente de los cosechadores de energía eléctrica a partir de vibraciones y su comportamiento resonante:



**Figura 2-3: Modelo equivalente de los PEH y su comportamiento resonante [1]**

Este sistema sería representado por la siguiente ecuación de movimiento:

$$''z_m(t)m + 'z_m(t)b + z_m(t)k = F(t), [3]$$

donde “m” representa la masa, “b” el coeficiente de amortiguamiento, que se divide en la suma de las pérdidas mecánicas “ $b_p$ ” y el coeficiente basado en la conversión de energía “ $b_e$ ”, y “k” la rigidez del resorte.

Esta ecuación representa una buena aproximación siempre y cuando la estructura vibre con ligeros desplazamientos y el comportamiento mecánico del movimiento permanezca lineal. Dicho sistema se caracteriza por una frecuencia natural o de resonancia ( $w_n$ ) dada por:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, [3]$$

En la práctica, " $w_n$ " debe ser diseñada de tal modo que coincida con la frecuencia predominante de las vibraciones ambientales, de modo que se pueda extraer el máximo de energía posible del transductor piezoeléctrico (como se muestra en la figura anterior). Bajo esta condición se dice que el sistema trabajara en resonancia. En este TFG se estudia un sistema experimental en el que se puede observar este fenómeno variando la frecuencia de las vibraciones de excitación del sistema.

Resolviendo " $z_m(t)$ " mediante el uso de la Transformada de Laplace y con la condición de estabilidad, se puede extraer la potencia que el transductor es capaz de extraer mientras trabaja en resonancia formulando la relación entre la porción de la potencia que fluye a través del amortiguador y el mecanismo de transducción.

$$P_e = \frac{m\zeta_e a^2}{4w_n(\zeta_p + \zeta_e)^2}, [3]$$

Donde "a" es la aceleración en el caso de una vibración sinusoidal. " $\zeta_p$ " y " $\zeta_e$ " son el coeficiente de amortiguamiento mecánico y de transducción respectivamente.

## 2.3 Modos de operación

Tal y como se introdujo en el apartado 2.2.1, se puede definir en los materiales piezoeléctricos un modo de operación que viene a indicar la direcciones de la tensión mecánica de excitación y del campo eléctrico resultante en un transductor piezoeléctrico, con referencia a los ejes "x", "y" y "z" (numerados del 1 al 3) y los cortes sobre estos, indicando rotación sobre los mismos (numerados del 3 al 6).

El sistema experimental tratado en este TFG trabajará en el denominado modo " $d_{31}$ ", que se detallará a continuación y que a su vez es la configuración más común de un PEH.

A parte del modo " $d_{31}$ ", existen otras configuraciones como el modo " $d_{33}$ " y el modo " $d_{15}$ ".

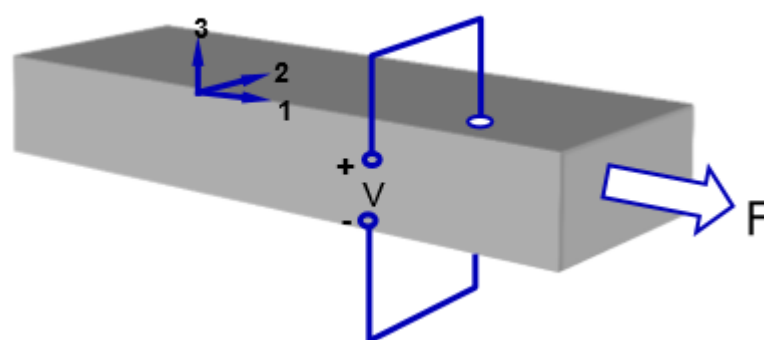
El modo " $d_{33}$ " fue desarrollado para incrementar la energía extraída del transductor pero presenta problemas de polarización debido a que un porcentaje del material piezoeléctrico no contribuye a la transducción de energía.

Por su parte, el modo " $d_{15}$ " ofrece un mejor rendimiento pero requiere un proceso complejo de fabricación.

### 2.3.1 Modo de operación d31

En el modo de operación " $d_{31}$ " el material presenta un campo eléctrico inducido en la dirección "3" como respuesta a una tensión mecánica en la dirección "1", como se puede ver representado en la **Figura 2-4**. Figura extraída de la ref.[3].

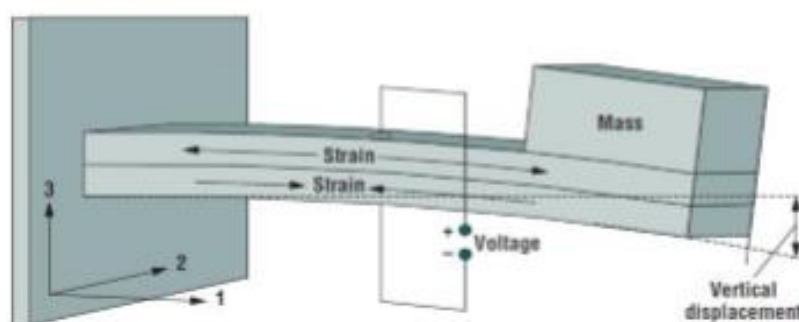
## 31 Mode



**Figura 2-4: Representación del modo de operación d31 [3]**

En este caso la salida eléctrica es proporcional al coeficiente “ $d_{31}$ ” según la ecuación descrita en el apartado 2.2.1, de ahí el nombre del modo.

Este modo también representa la configuración más común de los PEHs, la denominada “viga en voladizo”, ya que esta estructura crea de media la mayor tensión por una fuerza de entrada dada. Esta estructura queda representada en la **Figura 2-5**. Figura extraída de la ref. [1].



**Figura 2-5: Representación del sistema de viga voladiza [1]**

Las vibraciones ambientales se acoplan al sistema de la viga voladiza a través de la base de la viga, causando que la estructura oscile. El desplazamiento vertical que ocurre durante las oscilaciones se convierte en una señal AC a través del material piezoeléctrico.

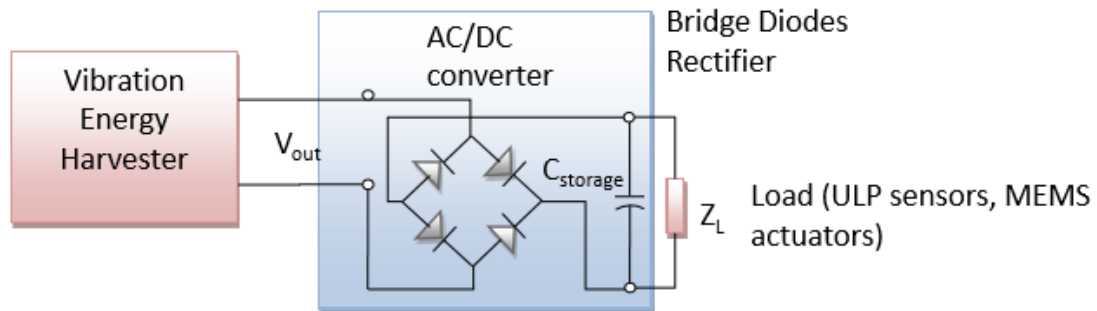
Como se ha comentado en el apartado 2.2.2, una de las consideraciones más importantes a la hora de diseñar un sistema experimental para la recolección de energía es hacer que la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico coincida con la frecuencia predominante de las vibraciones. Las configuraciones en voladizo presentan un estrecho ancho de banda, dado que la amplitud de la oscilación decrece rápidamente conforme la frecuencia de excitación se aleja de la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico.

La mayoría de las vibraciones ambientales se presentan con una baja frecuencia característica. Esto conduce a que sea necesario añadir una masa adicional al elemento piezoeléctrico para hacer que su frecuencia de resonancia disminuya y de ese modo coincida con la de las vibraciones ambientales. Este hecho es comprobado con el sistema experimental tratado en este TFG, visto más en detalle en el apartado 4.

## 2.4 Circuitería de acondicionamiento

El último paso para poder alimentar dispositivos electrónicos o cargar sus baterías es el diseño del circuito de acondicionamiento que permita transformar la señal AC que se obtiene a partir del transductor piezoeléctrico en una señal DC útil que pueda ser almacenada o aprovechada directamente.

Una estructura típica y básica de la circuitería de acondicionamiento se representa con el esquemático de la **Figura 2-6**. Figura extraída de la ref. [3].



**Figura 2-6: Diagrama del circuito de acondicionamiento estándar [3]**

Los generadores piezoeléctricos son fuentes AC por lo que su salida tiene que ser rectificada y regulada antes de alimentar a los dispositivos electrónicos o ser almacenada.

Para rectificar esta señal AC se hace uso de un puente rectificador de diodos de onda completa. Una vez rectificada, esta se almacena en un condensador. Esta estructura de convertidor AC-DC suele ser continuada por otro convertidor DC-DC para regular el voltaje y para una optimización energética, haciendo que la transferencia de potencia sea máxima mediante adaptación de impedancias.

## 2.5 Literatura hasta la fecha en el campo de los PEHs

En este apartado se presenta un breve resumen la literatura actual y hasta la fecha en el campo de los PEHs. Para hacer una pequeña distinción entre los distintos PEHs desarrollados hasta la fecha, este apartado se divide según la escala relativa de los mismos, desde los dispositivos desarrollados a macro escala hasta los dispositivos desarrollados a nanoescala.

### 2.5.1 PEHs desde macroescala a escala milimétrica

La investigación en el desarrollo de PEHs esta principalmente centrada en el desarrollo de dispositivos a baja escala que puedan alimentar dispositivos en las WSN. No obstante, también se han desarrollado sistemas a mayor escala que ofrecen una fuente de energía limpia.

En 2008, la *Japan East Railway Company* instaló un suelo piezoeléctrico en una puerta de salida en una estación de Tokyo para evaluar la capacidad ese sistema para generar energía, que llegó a generar unos 500 Kw.s por día en una superficie de 90 m<sup>2</sup>. En este mismo año en el Reino Unido se llevó a cabo un proyecto en que se alimentaba el 60% de un club nocturno, mediante la energía generada en una pista de baile [2].

En 2009, en un estudio piloto llevado a cabo por el *Innowattech Ltd.* junto con la colaboración del *Technion Israel Institute of Technology* se colocaron 10m de transductores piezoeléctricos bajo un tramo de carretera de Israel. La potencia promedio obtenida fue de

2000W y la energía obtenida fue almacenada en una batería situada a un lado de la carretera. No obstante, esta tecnología no es todavía lo suficiente madura para ser comercializada y se necesita más investigación en los costes que conlleva y el tiempo de vida de dichos sistemas [2].

En 2013 la empresa *Pavegen System* situó en el mercado una baldosa piezoeléctrica capaz de producir entre 5 W y 7 W de energía por pisada [2].

El objetivo de los PEHs a meso escala es alimentar a los dispositivos de las WSN y a los usados en implantes médicos. Los primeros ejemplos de dispositivos a meso escala se propusieron en los años 60 para alimentar los marcapasos, tecnología que hoy en día sigue investigándose. En el año 1984 se diseñó un PEH para generar energía eléctrica a partir del movimiento de las costillas durante la respiración. Más adelante, en 1995 *Antaki et al.* propusieron un PEH embebido en unas zapatillas para extraer energía de los pasos al caminar [2].

En 1996 se propuso por primera vez el uso de PEHs para alimentar dispositivos electrónicos portables, dado que estos suelen estar sujetos a un impacto mecánico durante su transporte [2].

Hoy en día empresas como *Mide' Vulture (Estados Unidos)*, de donde se ha adquirido el transductor piezoeléctrico de este TFG, *Linear Technology (Estados Unidos)*, de donde se ha adquirido la placa de evaluación empleada para el sistema experimental de este TFG, y *Holst-IMEC (Alemania)*, ofrecen como productos distintos PEHs de distintos tamaños para ajustarse a las distintas aplicaciones, junto con placas con la circuitería necesaria para el acondicionamiento de señal.

### 2.5.2. PEHs escala MEMS y escala nanométrica

En la última década se ha presentado un notable número de estudios sobre PEHs a escala MEMS debido a su pequeño tamaño y bajo coste por unidad, y por las ventajas de los PEHs comentadas anteriormente. Sin embargo, la funcionalidad de los PEHs depende fuertemente de sus dimensiones, y es vital maximizar la potencia de salida por unidad de volumen a escala MEMS. Esto es aún más desafiante en las finas películas piezoeléctricas debido a sus bajas eficiencias de conversión electromecánica. Otro de los problemas que se presentan a esta escala es la alta frecuencia de resonancia de los PEHs, difícil de reducirla por debajo de los 250 Hz a los que se suelen presentar las vibraciones ambientales comunes. En la actualidad, se siguen investigando técnicas que permitan aumentar el ancho de banda con el que se puede obtener una transferencia energética óptima.

Eichhorn y sus colaboradores [1], propusieron un PEHs activo que permitía variar la frecuencia de resonancia del sistema empleando el material PZT tanto para funcionar como cosechador de energía como de actuador. El dispositivo consistía en dos vigas voladizas y tres brazos. En el brazo central y más largo se presentaba el actuador, con los recolectores piezoeléctricos situados a los laterales. La unidad de control constaba de un microcontrolador, un acelerómetro y un convertidor para el acondicionamiento del voltaje del actuador. Con este sistema lograron sintonizar una frecuencia de resonancia entre los 150 y 215 Hz. Hoy en día este sistema continúa en investigación debido a ciertas ineficiencias que presentaba.

El material utilizado en dicho dispositivo, el PZT, es el material más común empleado en configuraciones MEMS, dado que es el que presenta mejores características.

En 2003 se publicó el primer estudio que hizo uso de pequeñas películas de PZT para el cosechado de energía a escala MEMS por parte de *Jeon et al.* [2].

En 2010 *Qi* y sus colaboradores [1] propusieron un método innovador para crear un material piezoeléctrico flexible de alta eficiencia. El método consistía en imprimir unas cintas de PZT

de pocos cientos de nanómetros de espesor sobre un sustrato PDMS, lo que permitió alcanzar unos coeficientes piezoeléctricos elevados aportando la ventaja de la flexibilidad.

Recientemente Dagdeviren y sus colaboradores [1] emplearon pequeñas películas de PZT para extraer energía eléctrica del movimiento del corazón, pulmones y diafragma. El PEH se colocó sobre una membrana flexible que integraba además un puente rectificador y una batería recargable y se encapsulo el sistema con capas biocompatibles, examinando la toxicidad del sistema con células lisas del musculo de una rata. Este sistema se comprobó en vivo en corazones bovinos y ovinos, produciendo energía suficiente para alimentar un marcapasos.

En cuanto a la escala nanométrica, los PEHs involucrados se llevan a cabo mediante nanocables sintetizados a partir de materiales piezoeléctricos.

Estos nanogeneradores piezoeléctricos fueron por primera vez introducidos en 2006 por el *Georgia Institute of Technology* [2].



## 3 Diseño

---

Una vez introducido anteriormente el funcionamiento teórico de los PEHs, en este apartado se definirá de forma general el modelo del sistema experimental diseñado y empleado en este TFG para entender de forma práctica el funcionamiento de los transductores piezoeléctricos y de la circuitería necesaria para el acondicionamiento de señal.

El sistema experimental consta de 3 componentes principales: una infraestructura encargada de generar las vibraciones mediante un motor DC, un modelo comercial de un transductor piezoeléctrico encargado de recibir las vibraciones generadas por el motor y de realizar la conversión electromecánica, y por último un modelo comercial de una placa de evaluación encargada de acondicionar y regular la señal eléctrica obtenida a partir del transductor piezoeléctrico.



**Figura 3-1: Componentes principales del sistema experimental**

Destacar que para alimentar al motor DC, se usará una fuente de alimentación, pero la energía eléctrica total generada por el sistema será la que el PEH transforma de la energía mecánica producida por las vibraciones, por lo que en ningún momento la energía eléctrica que se consigue generar proviene de esta fuente de alimentación.

### 3.1 Estructura generadora de vibraciones

En este TFG se pretende adquirir un conocimiento medio sobre la tecnología involucrada en los PEHs y sobre el funcionamiento de los mismos, por ello mismo no se aprovecha una vibración común que se pueda desarrollar en el entorno sino que se plantea un modo de generar vibraciones de amplitud y frecuencia variable mediante las cuales se pueda observar el fenómeno piezoeléctrico y sacar conclusiones.

En un principio, se pensó en adquirir un modelo de un kit comercial que permitiera generar de forma controlada vibraciones de distinta amplitud y frecuencia. Este elemento forma parte del “*Energy Harvester Development Kit*” de la compañía *Smart Material*. La **Figura 3-2** representa el modelo del vibrador incluido en el kit comercial.



**Figura 3-2: Modelo comercial del generador de vibraciones [9]**

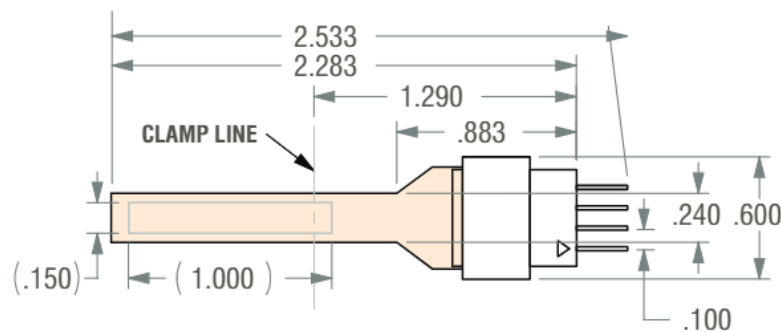
El coste y el tiempo necesario para adquirir el producto desestimaron esta opción. Por lo tanto, se pensó en desarrollar una infraestructura que fuera capaz de reproducir lo mejor posible las oportunidades de desarrollo que ofrecía el modelo comercial.

Para ello, la infraestructura constará de un elemento principal como es el motor DC y de una pequeña viga de madera rígida para la sujeción del mismo. El hecho de que sea lo más rígida posible es importante, dado que de ese modo no se disiparán las vibraciones en la estructura. El motor irá encajado en una apertura de la viga de modo que este permanezca estable y sujeto mientras transmite las vibraciones que su propio funcionamiento genera a la viga, unificándose ambos en una estructura vibratoria de la cual sea posible situar de manera más sencilla el transductor piezoeléctrico.

Con vistas a variar la amplitud y la frecuencia predominante en las vibraciones generadas por el propio motor, se colocarán distintas piezas en su eje rotatorio para poder variar el momento inercial y se alimentará el motor con varias tensiones continuas con el objetivo de variar la velocidad de rotación del eje. De este modo se consigue excitar al PEH con vibraciones de distintas amplitudes y frecuencias características para poder observar el efecto que tienen sobre este.

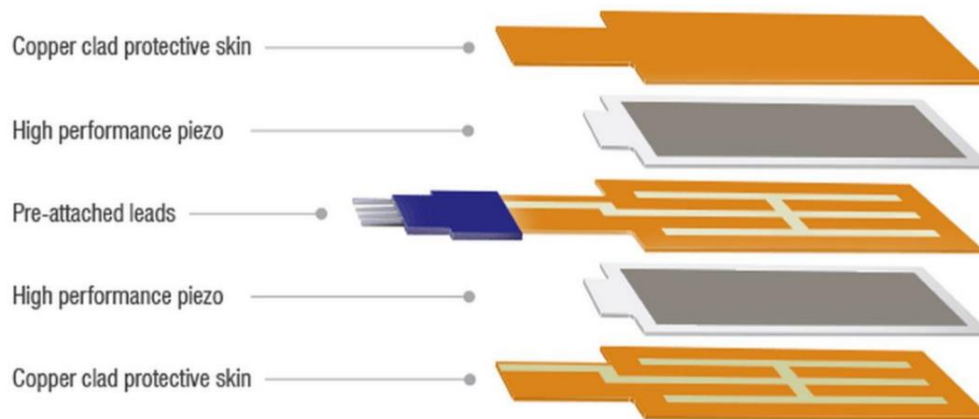
### 3.2 Piezoelectric Energy Harvester

Como fuente de energía piezoeléctrica se ha adquirido un modelo comercial de PEH. Este modelo es el *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester*, que convierte la energía mecánica de las vibraciones en energía eléctrica. *Mide* presenta una patentada tecnología de empaquetamiento piezoeléctrico que empaqueta los materiales piezoeléctricos protegidos por una lámina protectora de cobre con los cables eléctricos pre-enlazados, lo que da lugar a un dispositivo robusto y sin soldaduras, que también proporciona aislamiento eléctrico y protección contra la humedad y contaminantes [10].



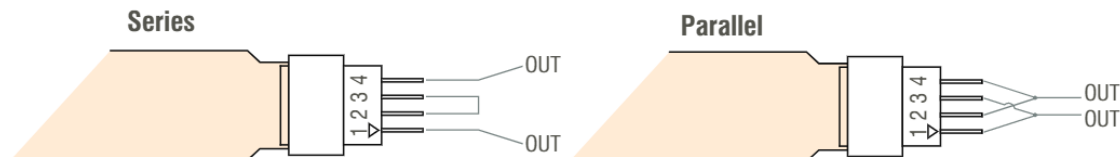
**Figura 3-3: Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester [10]**

En la **Figura 3-4** se muestra un diagrama representativo de la tecnología de empaquetamiento patentada por *Mide*, que integra dos láminas piezoeléctricas en cada *Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester*.



**Figura 3-4: Tecnología de empaquetamiento patentada por Mide [10]**

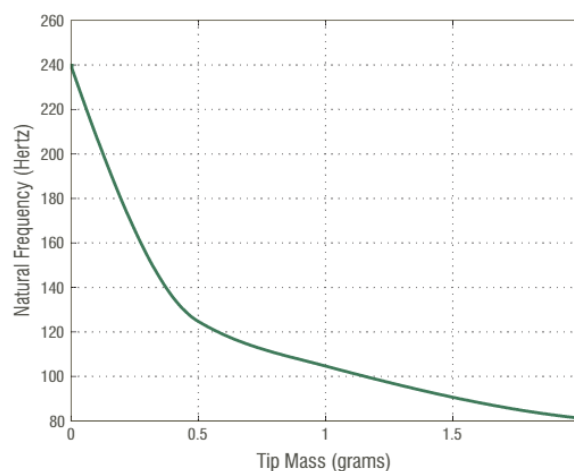
Las dos laminas piezoeléctricas se pueden usar individualmente o se pueden unir en serie o paralelo para incrementar el voltaje o la corriente de salida respectivamente comparado a la salida que ofrecen individualmente. Independientemente de la configuración escogida la energía generada por el *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester* será la misma.



**Figura 3-5: Representación de la configuración serie y paralelo del Mide Vulture V22B [10]**

Mide recomienda el uso de la configuración en paralelo para la mayoría de aplicaciones, y es la configuración que se ha llevado a cabo en este TFG.

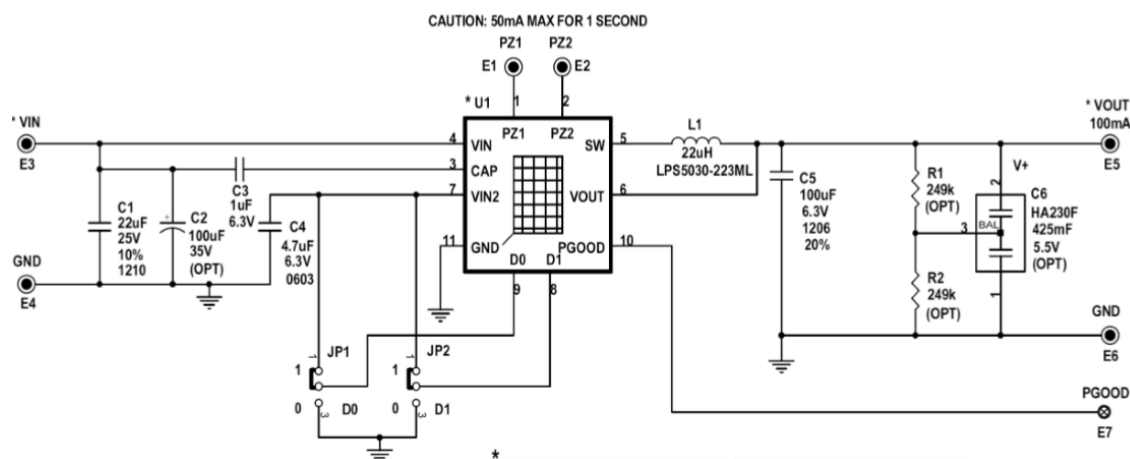
La frecuencia de resonancia del *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester* viene determinada por sus dimensiones. En el caso de querer modificar esta frecuencia se debe añadir una pequeña masa sujeta al dispositivo. La relación entre esta pequeña masa y la frecuencia de resonancia del *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester* se muestra en la **Figura 3-6**:



**Figura 3-6: Relación entre la masa extra añadida y la frecuencia de resonancia [10]**

### 3.3 Circuito acondicionador de señal

La **Figura 3-7** y la **Figura 3-8** muestran el diagrama del circuito y el diseño de la placa del *Demo Circuit 1459B-A*. La **Figura 3-9** muestra la configuración de los pines D1 y D0 que seleccionan el voltaje de salida en el pin VOUT. Para el sistema experimental desarrollado en este TFG ambos estarán configurados como lógico alto para un voltaje de salida de 3.6 V. Para que el LTC3588-1 pueda entregar una tensión regulada a su salida se necesita un voltaje mínimo a la entrada de  $V_{IN}=4.3V$ .



**Figura 3-7: Diagrama del LT Demo Circuit 1459B-A [11]**

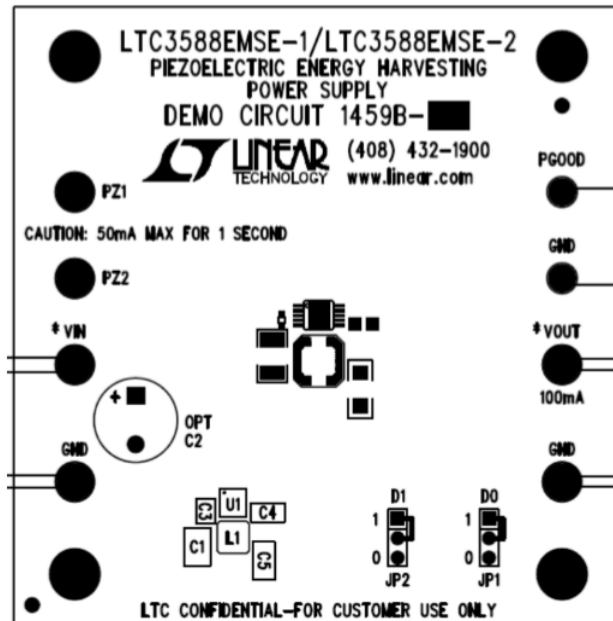
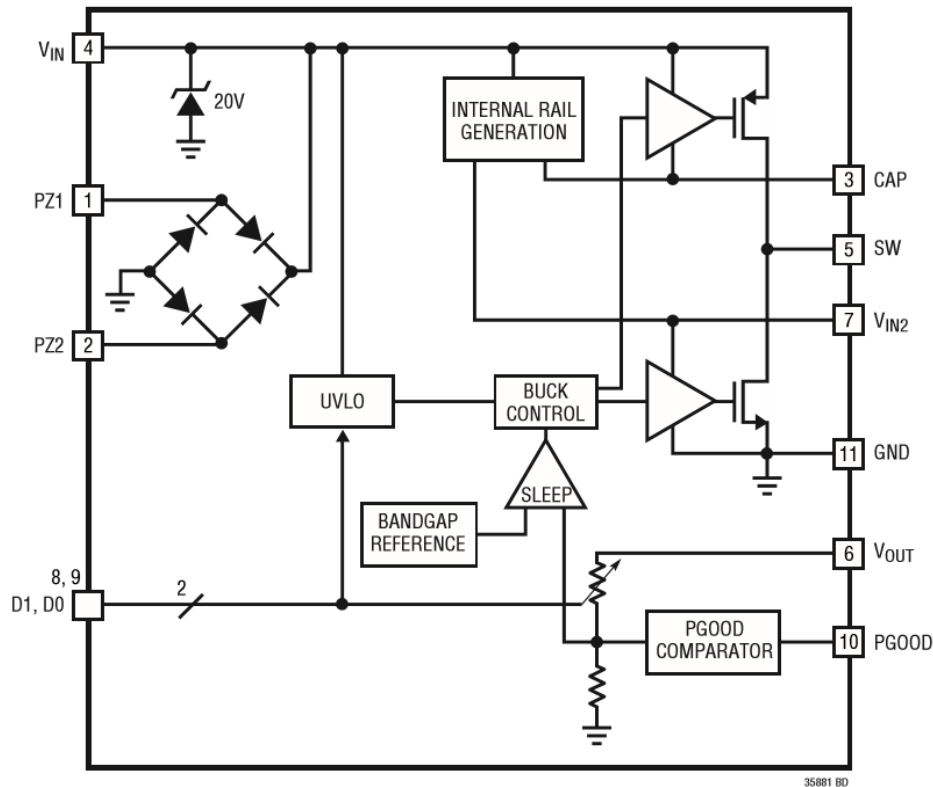


Figura 3-8: Diseño de la placa del Demo Circuit 1459B-A [11]

ASSEMBLY	U1	* VIN	* VOUT			
DC1459B-A	LTC3588EMSE-1	2.6V-20V	1.8V	2.5V	3.3V	3.6V
DC1459B-B	LTC3588EMSE-2	14V-20V	3.45V	4.1V	4.5V	5.0V
JUMPER SETTINGS		D1	0	0	1	1
		D0	0	1	0	1

Figura 3-9: Configuración de los pines del Demo Circuit 1459B-A [11]

En la **Figura 3-10** se puede observar el diagrama de bloques del LTC3588-1:



**Figura 3-10: Diagrama de bloques del LTC3588-1 [12]**

La funcionalidad de los pines del LTC3588-1 es la siguiente:

- **PZ1 Y PZ2 (Pin 1 y 2):** Conexiones de entrada para el transductor piezoeléctrico.
- **CAP (Pin3):** Vía interna referenciada a VIN para servir como puerta de guía al interruptor PMOS del regulador Buck.
- **VIN (Pin 4):** Voltaje rectificado de entrada.
- **SW (Pin 5):** Interruptor para la conmutación del regulador Buck.
- **VOUT (Pin 6):** Pin para monitorizar el voltaje de salida y ajustarlo mediante retroalimentación interna.
- **VIN2 (Pin 7):** Vía interna de bajo voltaje para servir como puerta de guía al interruptor NMOS del regulador Buck. También sirve como vía cuando se seleccione un 1 lógico para los bits de selección de voltaje de salida D1, D0.
- **D1, D0 (Pin 8 y 9):** Bits de selección de voltaje de salida. Se enlazarán a VIN2 cuando se seleccione un 1 lógico y a GND cuando se seleccione un 0 lógico.
- **PGOOD (Pin 10):** Pin de salida que corresponderá a un 1 lógico cuando VOUT sobrepase el 92% del voltaje de salida seleccionado mediante D1 y D0.
- **GND (Pin expuesto 11):** Tierra. Debe conectarse a un plano de tierra en la segunda capa del PCB por vías internas bajo el LTC3588-1.

### 3.3.1 Principio de operación del Demo Circuit 1459B-A

Tal y como se ha introducido anteriormente, el *Demo Circuit 1459B-A* contiene la fuente de alimentación LTC3588-1, diseñada específicamente para aplicaciones de EH. *Demo Circuit 1459B-A* está diseñado para interactuar directamente con un PEH, en el caso de este TFG el *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester*, rectificar la señal que proviene del mismo y almacenar la energía recolectada en un condensador externo, manteniendo un voltaje de salida regulado por medio de un regulador Buck síncrono de alta eficiencia.

La señal eléctrica que proviene del *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester* con sus pines configurados en paralelo, será conectada a los pines PZ1 y PZ2 del *Demo Circuit 1459B-A*. Una vez recibida, el puente rectificador de onda completa incorporado en el LTC3588-1 será el encargado de rectificar la señal AC que proviene del transductor piezoeléctrico. Esta señal rectificada será almacenada en un condensador localizado en el pin VIN, hasta que el voltaje en este pin supere el umbral de la ventana de histéresis UVLO (200mV superior al voltaje de salida seleccionado con los pines D1 y D0), momento en cual el regulador Buck se activa y se transfiere la carga de ese condensador de entrada a un condensador de salida. Cuando el voltaje del condensador de entrada cae por debajo del umbral UVLO el regulador Buck se desactiva.

Dos vías internas, CAP y VIN2, que se generan de VIN, se usan para conducir los interruptores PMOS y NMOS del regulador Buck, respectivamente, como se ha detallado en la funcionalidad de los pines del LTC3588-1.

El regulador Buck emplea un algoritmo de voltaje de histéresis para controlar la tensión de salida a través de una retroalimentación del pin VOUT. El regulador Buck carga un condensador de salida a través de una bobina hasta un valor ligeramente superior que el voltaje de regulación seleccionado. Esto lo consigue elevando la corriente que atraviesa la bobina hasta los 260mA a través de un interruptor interno PMOS y luego descendéndola hasta los 0mA a través de un interruptor interno NMOS. La velocidad a la que realiza este proceso viene determinada por VIN, VOUT y el valor de la bobina.

Si el voltaje de entrada al regulador cae por debajo del umbral UVLO antes de que el voltaje de salida alcance la regulación, el regulador Buck se desconectará y no se activará hasta que el voltaje de entrada se eleve de nuevo por encima del límite del umbral UVLO.

Cuando el regulador Buck consigue que el voltaje de salida mantenga una regulación, este entra en un estado de reposo en el cual monitoriza la tensión de salida con un comparador. Durante este modo de operación la corriente de salida Ivout es proporcionada por el condensador de salida. Cuando el voltaje de salida cae por debajo del voltaje de regulación el regulador Buck abandona el estado de reposo y el ciclo se repite. Este método de histéresis de proporcionar una salida regulada reduce las pérdidas asociadas con la conmutación FET. De media, el regulador Buck entrega como mínimo una corriente de 100mA mientras conmuta.

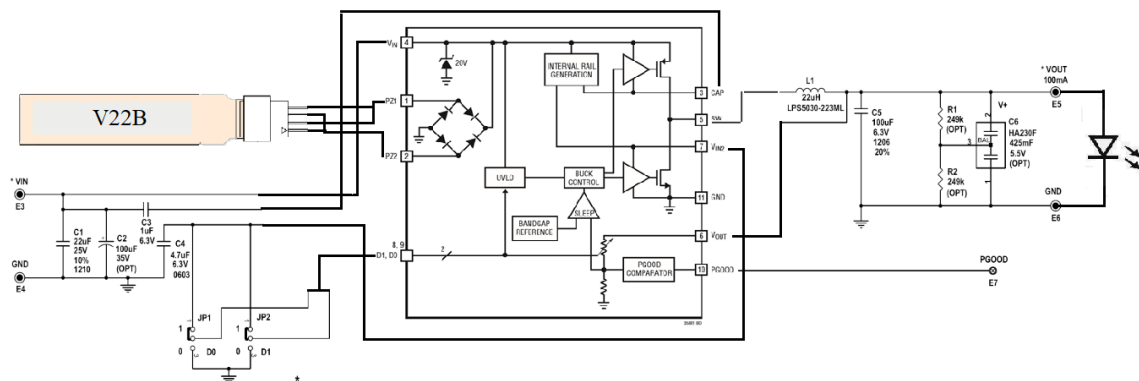
El bloque comparador Power Good produce un 1 lógico en el pin PGOOD referenciado a VOUT la primera vez que el regulador Buck alcance la tensión de salida programada por los pines D1 y D0, indicando que la salida se encuentra en regulación. Este pin PGOOD mantendrá el 1 lógico hasta que VOUT caiga por debajo del 92% del voltaje de regulación deseado. Por otro lado, si PGOOD se mantiene en 1 lógico y voltaje en VIN cae por debajo del umbral de la ventana UVLO (el regulador Buck se desconectaría), el pin PGOOD seguirá

manteniendo el 1 lógico hasta que el voltaje en VOUT caiga por debajo del 92% del voltaje de regulación seleccionado. Esto permite que se pueda seguir haciendo uso de la energía en la salida incluso si se pierde la energía de entrada.

### 3.4 Circuito completo del sistema experimental

Por último, a la salida de la placa *Demo Circuit 1459B-A* se colocará un diodo LED para comprobar que una vez el sistema experimental esté en funcionamiento este generará energía eléctrica aprovechable por dispositivos electrónicos.

La representación del circuito completo que forma parte del sistema experimental desarrollado en este TFG es la mostrada en la **Figura 3-11**.

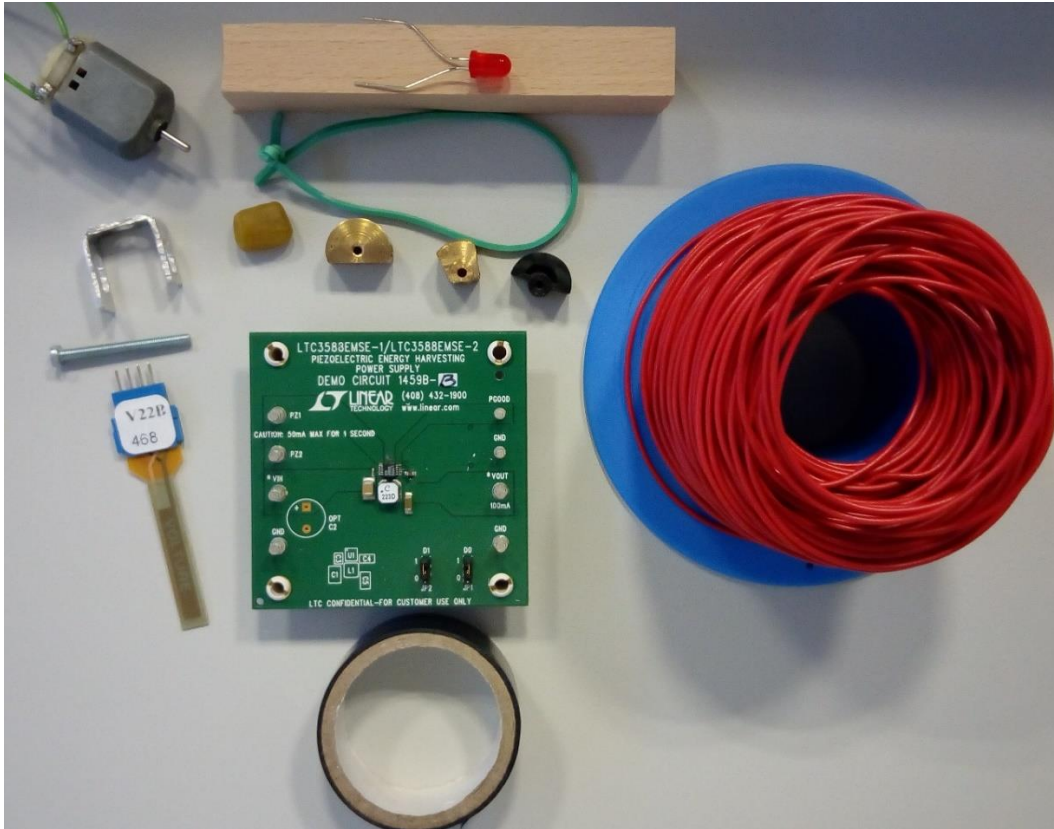


**Figura 3-11: Diagrama del circuito completo**



## 4 Desarrollo

El desarrollo y la construcción del sistema experimental desarrollado para este TFG se muestra en los siguientes apartados. La **Figura 4-1** muestra todos los componentes empleados para la realización de este sistema experimental y la **Tabla 4-1** representa un listado de los componentes utilizados.



**Figura 4-1: Componentes empleados para el desarrollo del sistema experimental**

COMPONENTE	CANTIDAD	FUNCIÓN
Motor DC	1	Generar vibraciones
Viga de madera	1	Sujeción del motor y del PEH
Led	1	Comprobar la generación de energía eléctrica
Goma elástica	15cm	Aislamiento de vibraciones
Pieza de metal	1	Sujeción del PEH
Cera de abeja	2 gr	Modificar la frecuencia de resonancia del PEH
Piezas de latón	2	Variar el momento inercial del motor
Cable	50 cm	Conexiones eléctricas
Mide Vulture™ V22B	1	Transductor piezoeléctrico
Piezoelectric Energy Harvester		
LT Demo Circuit 1459B-A	1	Circuito acondicionador
Cinta aislante	10cm	Sujeción del motor
Tornillo	1	Sujeción pieza de metal

**Tabla 4-1: Listado componentes utilizados**

#### 4.1 Construcción de la estructura vibratoria

Tal y como se ha comentado en el apartado 3 de este documento, el objetivo era diseñar un sistema que pudiera sustituir al generador de vibraciones incluido en el *Energy Harvesting Development Kit* de *Smart Materials*. Este proceso, a pesar de su carente contenido meramente científico, resulta de ser de gran relevancia en la consecución de los objetivos propuestos para este TFG y de un tiempo invertido en él muy considerable, tanto en su diseño como en su desarrollo, con el objetivo obtener una estructura que pudiera generar vibraciones variables para poder parametrizar la excitación mecánica de entrada y la señal eléctrica resultante a la salida del transductor piezoeléctrico. Por lo tanto, de tal importancia se deriva la inclusión de su desarrollo en este documento.

La estructura generadora de vibraciones está formada principalmente por una pequeña viga de madera que se aprovechará de las vibraciones generadas por el funcionamiento de un motor DC.

Un hecho que a simple vista carece de importancia pero que cabe destacar es la selección del tamaño de la viga de madera. Se diseñó un tamaño de manera que se pudiera encajar el motor en ella y que el eje del motor quedara al aire libre, ya que se cambiarán las piezas sobre este para generar vibraciones de distinta amplitud, y que a su vez se pudiera colocar sobre él el transductor piezoeléctrico empleado en este TFG (*Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester*).

Para poder encajar el motor en la viga de madera se cortó una parte de esta y se limó la nueva superficie generada con el objetivo de eliminar irregularidades, añadiendo cinta aislante a las superficies generadas para dotar de mayor succión al motor, dado que con las vibraciones que genera cabe la posibilidad de que se pueda desenganchar de la estructura. El resultado final se detalla en la **Figura 4-2**.



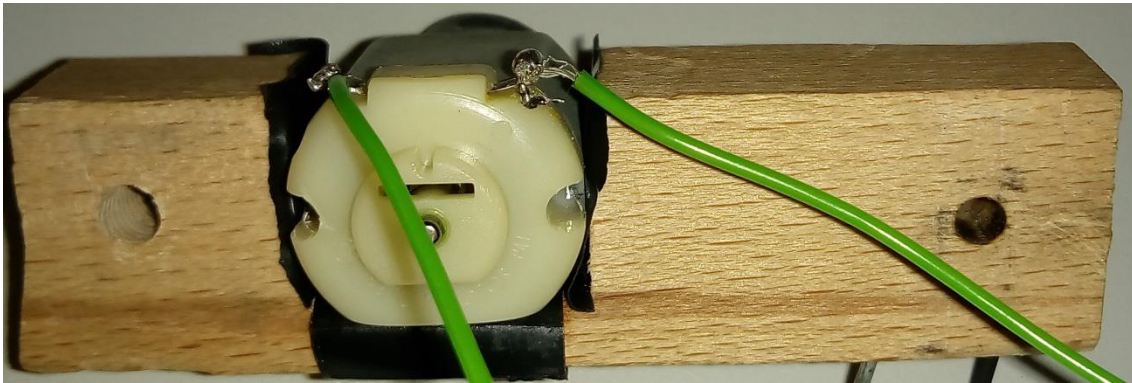
**Figura 4-2: Cortes en la viga de madera**

Por otro lado, con el objetivo alimentar al motor DC, se soldaron 2 cables de pocos centímetros a los puntos de alimentación, tal y como se muestra en la **Figura 4-3**.



**Figura 4-3: Motor DC con los cables soldados**

Finalmente, para completar la estructura encargada de generar las vibraciones se encaja el motor en la viga de madera, tal y como se detalla en la **Figura 4-4**.



**Figura 4-4: Motor DC encajado en la viga de madera**

La alimentación del motor se llevó a cabo con la fuente de alimentación variable *Agilent U8032A*, mostrada en la **Figura 4-5**:



**Figura 4-5: Fuente de alimentación variable *Agilent U8032A***

#### 4.1.1 Construcción de las piezas del eje de revolución

Para poder excitar el *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester* con vibraciones de distinta amplitud, se desarrollaron 2 piezas más de distinto peso que se pudieran unir al eje del motor, aparte de la pieza de plástico que viene incorporada por defecto.

(esta parte no me acuerdo bien si era un tubo y como se llama la pieza que va enroscada y aprieta el eje del motor)

Para ello se cortaron 2 piezas de un tubo de latón, a las que se les perforaron 2 orificios, 1 de ellos en el centro de la circunferencia del mismo radio que el eje del motor y el otro en una parte del radio externo llegando hasta el primer orificio realizado, con el objetivo de introducir un tornillo de fijación para el eje del motor, para que la pieza no salga disparada cuando el motor esté en funcionamiento. Para que estas 2 piezas generen distintas amplitudes de vibración cuando estén situadas en el eje del motor deben ser de distinto peso, por lo que en una de ellas se eliminó más cantidad de latón que en la otra.

Finalmente, las 3 piezas utilizadas para variar el momento inercial en el motor son las representadas en la **Figura 4-6**.

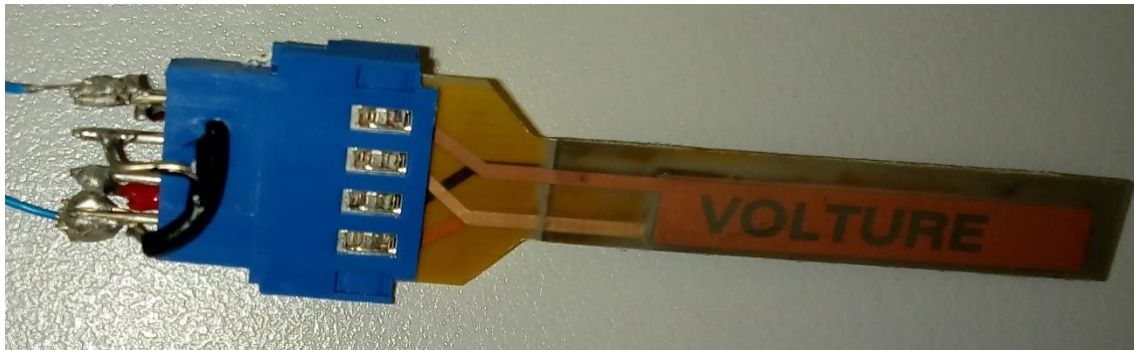


**Figura 4-6: Piezas para generar distintas amplitudes de vibración**

#### 4.2 Preparación del PEH

Atendiendo a la **Figura 3-4**, donde se representan las distintas configuraciones de pines que se pueden establecer en el *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester*, se puentearán el pin 1 con el 3, y el 2 con el 4, de modo que el *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester* siga una configuración en paralelo. Para ello se soldará entre estos pines un pequeño fragmento de cable, siendo el resultado final el mostrado en la **Figura 4-7** y en la **Figura 4-8**:





**Figura 4-7: Puente entre el pin 1 y 3 del Mide Vulture V22B**



**Figura 4-8: Puente entre el pin 2 y 4 del Mide Vulture V22B**

### ***4.3 Integración de los elementos del sistema experimental***

En este apartado se describirá el proceso de integración de cada una de las 3 partes principales que forman el sistema experimental desarrollado para este TFG. No obstante, ciertos detalles serán desarrollados en el apartado **4.4**, donde se describe un recorrido de desarrollo hasta llegar a la última versión del sistema experimental con la cual se han realizado las pruebas y analizado los resultados.

#### **4.3.1 Sujeción del Mide Vulture 22B con la estructura vibratoria**

Tal y como se comentó en el apartado **2.2**, para una optimización en el proceso de recolección de energía se montará el *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester* en una configuración voladiza, siguiendo el modo de operación “d31”.

Para poder sujetar el *Mide Vulture V22B Piezoelectric Energy Harvester*, se colocará una abrazadera de metal por encima apretándolo con la madera. La abrazadera empleada se representa en la **Figura 4-9**:



**Figura 4-9: Abrazadera de sujeción del Mide Vulture V22B**

Un factor importante a tener en cuenta en la sujeción del *Mide Vulture V22B* es la denominada “clamp line”, es decir, una línea virtual donde debe ir la abrazadera para asegurar que el transductor piezoeléctrico se encuentra correctamente sujeto. En cada modelo de PEH el fabricante recomienda una *clamp line*, siendo la recomendada para el *Mide Vulture V22B* la indicada en la **Figura 3-3**. Además, esta abrazadera debe estar construida por un material rígido para minimizar la disipación de energía a través de esta y debe estar libre de irregularidades y defectos para minimizar el estrés creado sobre el transductor y evitar su deterioro, por lo que a la hora de fabricar y cortar esta pieza se ha limado toda su superficie. En ambos laterales se ha practicado un orificio por el cual se pueda introducir un tornillo para aumentar la sujeción. Este tornillo traspasaría la madera por los orificios también practicados en ella, que se pueden observar en la **Figura 4-2** y en la **Figura 4-4**.

Para aplicaciones en la que la instalación sea duradera, esta estructura de sujeción debe ser apropiadamente atornillada y reforzada con arandelas para que la estructura no pierda presión con el paso del tiempo.

En el apartado **4.4** se detallará finalmente cómo se ha llevado a cabo esta sujeción.

#### **4.3.2 Conexión del Mide Vulture 22B con el Demo Circuit 1459B-A**

Tras puentear los pines 1 y 3, y los pines 2 y 4, se soldará un cable a cada una de las conexiones resultantes que se unirán a los pines PZ1 y PZ2 del *Demo Circuit 1459B-A* con pinzas o mediante los propios cables del osciloscopio para el análisis de la señal. En este caso no se soldarán los cables para facilitar el estudio del sistema. Del mismo modo, se colocará el LED entre los pines VOUT y GND del *Demo Circuit 1459B-A* cuando se requiera comprobar que se entrega energía aprovechable a la salida del sistema experimental. Este proceso queda representado en la **Figura 4-10**:

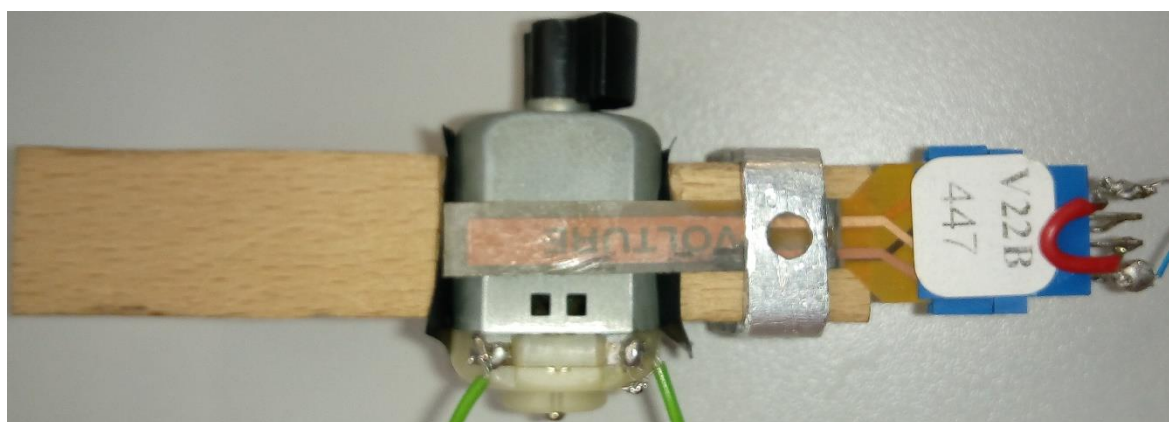


**Figura 4-10: Conexión del LED y *Mide Vulture V22B* con el Demo Circuit 1459B-A**

#### **4.4 Desarrollo de la integración completa del sistema**

En este apartado se relatará brevemente el proceso que se ha llevado a cabo hasta llegar a la última versión del sistema experimental con el que se han realizado las pruebas correspondientes, detalladas en el apartado 5. El primer objetivo que se pretendía lograr era conseguir que el *Demo Circuit 1459B-A* proporcionase una tensión regulada a su salida que pudiera ser aprovechable, y una vez conseguido esto tener un sistema cuyo comportamiento fuera lo más estable dentro de lo posible para la realización de las pruebas correspondientes.

Una vez se prepararon cada una de las 3 partes que forman el sistema experimental se llevó a cabo la primera prueba situando la estructura vibratoria encima de una mesa con el transductor piezoeléctrico sujeto a esta, tal y como se muestra en la **Figura 4-11:**

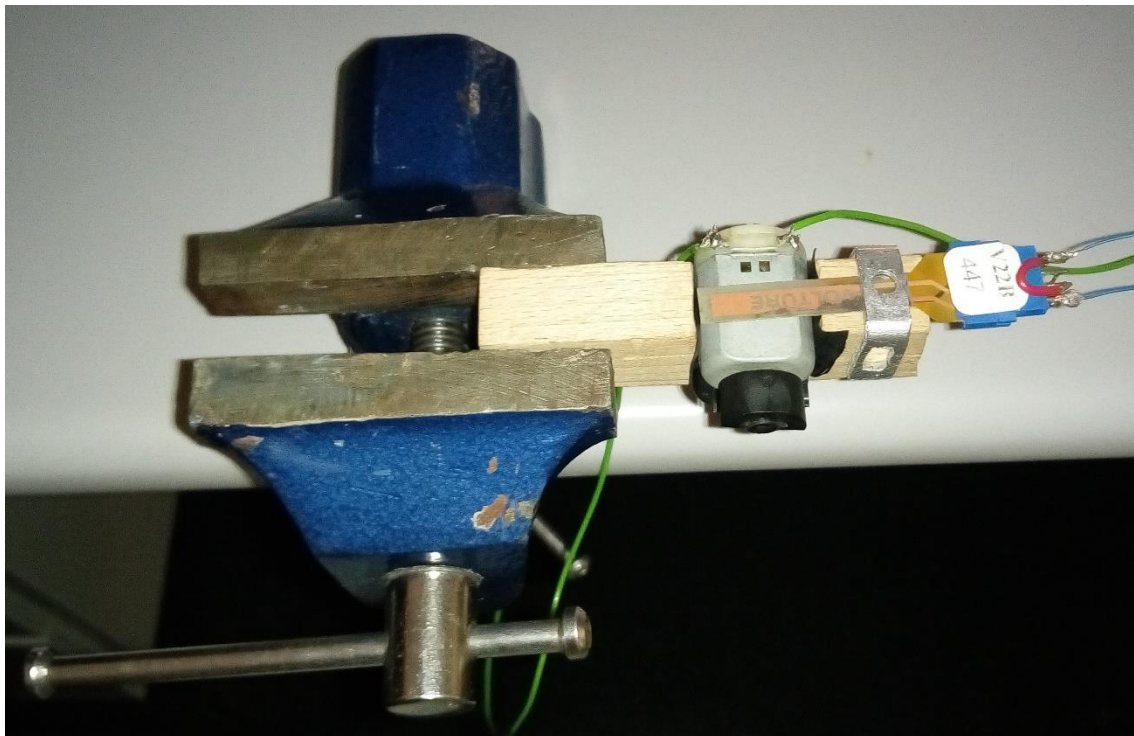


**Figura 4-11: Estructura vibratoria situada en una mesa**

Con esta primera versión y analizando la señal de salida del *Mide Vulture V22B* se pudo observar por primera vez el efecto piezoeléctrico. En este caso la señal era muy débil, de unos 800mV de tensión pico-pico que no eran suficientes para que el *Demo Circuit 1459B-A* fuera capaz de entregar a su salida la tensión de salida de 3.6V que se configuró con los pines D1 y D0.

Por otro lado, el problema principal que presentaba esta estructura era que debido a la energía mecánica producida por el motor, la estructura vibratoria se movía sin parar por la mesa mientras este estaba en funcionamiento.

Por consiguiente, el siguiente paso radicaba en poder sujetar la estructura vibratoria, por lo que se sujetó esta con una mordaza de presión, tal y como se muestra en la **Figura 4-12**.

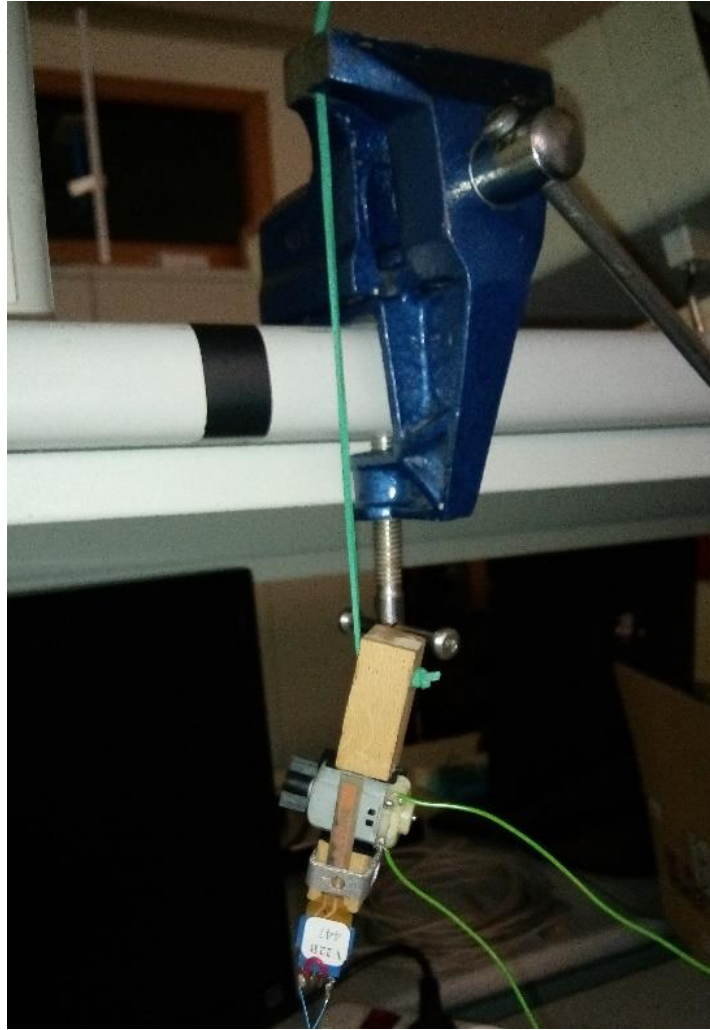


**Figura 4-12: Sujeción de la estructura vibratoria con la mordaza de presión**

No obstante, las vibraciones generadas por esta estructura se transmitían a la propia mesa donde se colocaba la mordaza y se disipaban en ella, por lo que finalmente la señal eléctrica a la salida del transductor no era suficiente para que el *Demo Circuit 1459B-A* fuera capaz de mantener una tensión regulada a su salida.

El siguiente paso que se llevó a cabo fue aprovechar uno de los orificios practicados en la viga de madera (**Figura 4.2** y **Figura 4.4**) para pasar por uno de ellos una goma que iría sujeta a la mordaza, de modo que las vibraciones se aislaran y no se traspasaran a la mordaza. Esta configuración es la mostrada en la **Figura 4-13**:



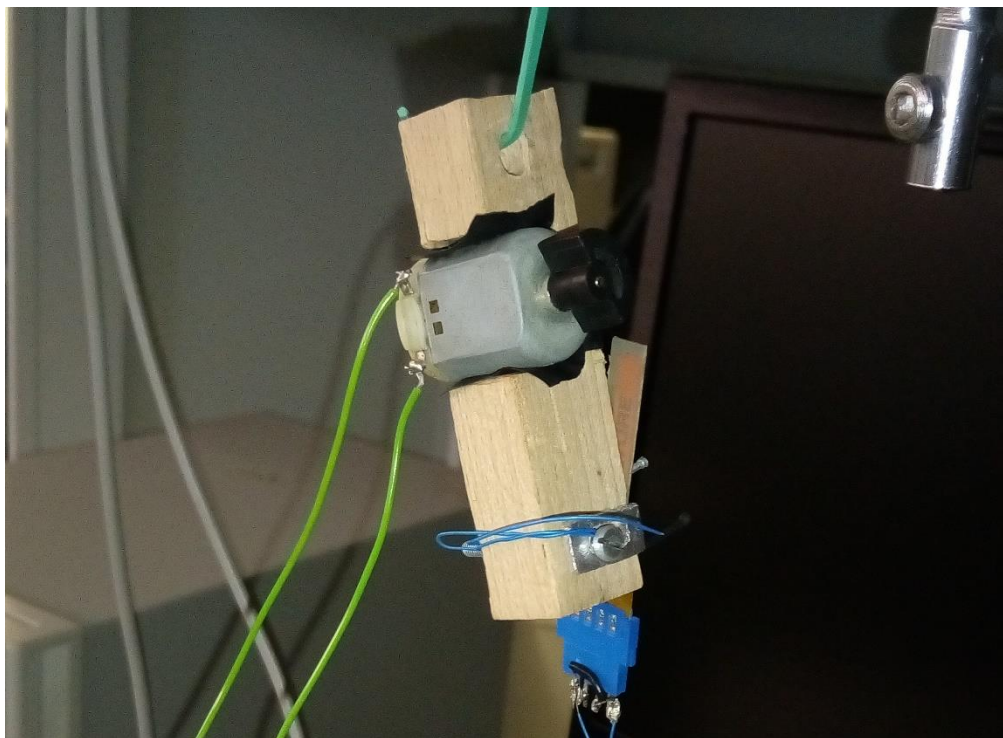


**Figura 4-13: Sujeción de la estructura vibratoria con la goma**

Llegados a este punto se pudo comprobar que las vibraciones resultaban ser lo suficientemente fuertes pero todavía el sistema no era capaz de generar a la salida del *Mide Volture V22B* la energía eléctrica suficiente como para que el *Demo Circuit 1459B-A* entrara en regulación.

En este punto y tras varias comprobaciones, se pensó en dejar una mayor libertad de movimiento al *Mide Volture V22B* para que el desplazamiento vertical del *Mide Volture V22B* durante las vibraciones fuera mayor, de modo que se ampliara la amplitud de movimiento relativa comparándose a la amplitud de las vibraciones. De este modo y tal como se comentó en el apartado 2, el *Mide Volture V22B* podrá generar mayor cantidad de energía eléctrica. Para dotar de mayor libertad de movimiento al *Mide Volture V22B*, este pasó de estar situado encima del motor a estar situado encima de la madera dejando una parte de su longitud al aire libre para que pudiera desplazarse verticalmente de forma correcta.

Con esta nueva configuración, representada en la **Figura 4-14** se comprobó por primera vez que el sistema experimental era capaz de ofrecer a la salida del *Demo Circuit 1459B-A* la tensión regulada de  $V_{OUT}=3.6V$  que se configuró con los pines D1 y D0.



**Figura 4-14: Estructura final del sistema experimental**

## 5 Integración, pruebas y resultados

En este apartado se detallarán las pruebas realizadas con el sistema experimental para poder entender el funcionamiento de la tecnología involucrada en el campo de los PEHs y se comentarán los resultados obtenidos, intentando establecer una relación con el modelo teórico. También se comentarán las dificultades encontradas en el proceso de realización de las pruebas.

Las pruebas se realizaron examinando las señales de salida con un osciloscopio de la serie *Agilent InfiniiVision*, mostrado en la **Figura 5-1**:



**Figura 5-1: Osciloscopio digital Agilent InfiniiVision**

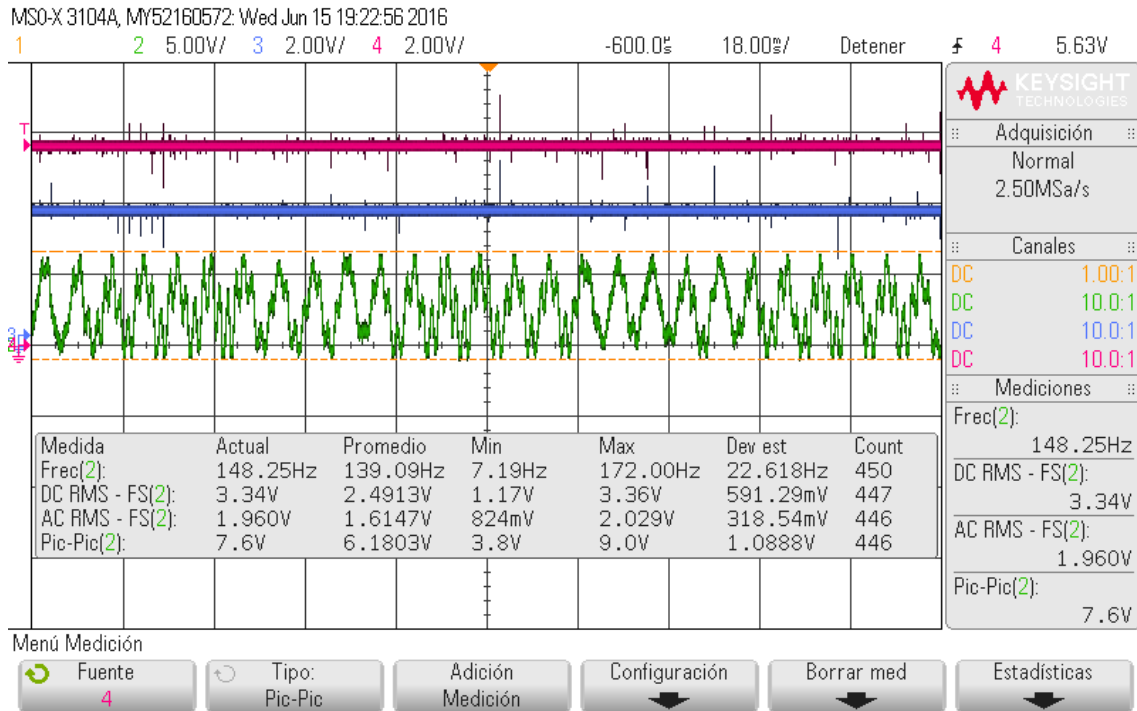
Para excitar al sistema experimental con las vibraciones generadas por el funcionamiento del motor, este se alimentó en un rango de 0 a 2V, debido a que llegando a este último valor, en algunas circunstancias los cables finos conectados a los pines del *Mide Vulture V22B* se partían en su conexión a los pines PZ1 y PZ2 del *Demo Circuit 1459B-A*, y en otros casos se partían en la propia soldadura a los pines propios del *Mide Vulture V22B*. Salvo esta dificultad de que al ser finos se partían, era necesario hacerlo así debido a que con unos cables más gruesos estos forzaban al propio *Mide Vulture V22B* a mantener una posición que dependía totalmente de la colocación de los cables al tener estos un mayor peso que el transductor piezoeléctrico. Otra dificultad a la hora de excitar al sistema residía en que cuanto mayor era esta excitación, más inestable era el comportamiento de la estructura, dado que el motor se acababa moviendo y desajustando de su encaje, y la mordaza que apretaba al *Mide Vulture V22B* contra la viga se aflojaba y el transductor se acababa saliendo o se desplazaba continuamente, lo que hacía variar completamente a cada momento la señal de salida resultante. No obstante, aunque la mordaza estuviera sujetando al *Mide Vulture V22B*, este acababa desplazándose lateralmente, por lo que a ambos lados se colocaron unos pequeños clavos en la viga de madera para limitar el movimiento del transductor cuando esto ocurriera.



**Figura 5-2: Limitación del PEH con los clavos**

Tras el proceso descrito en el apartado 4.3.2 la primera prueba que se realizó fue comprobar cómo era la señal eléctrica necesaria para tener el voltaje mínimo de 4.4V en el pin VIN del *Demo Circuit 1459B-A* para que la fuente de alimentación LTC3588-1 incorporada pudiera regular el voltaje de salida seleccionado con los pines D1 y D0. Ambos se configuraron como un 1 lógico lo que corresponde a  $V_{OUT} = 3.4V-3.7V$ .

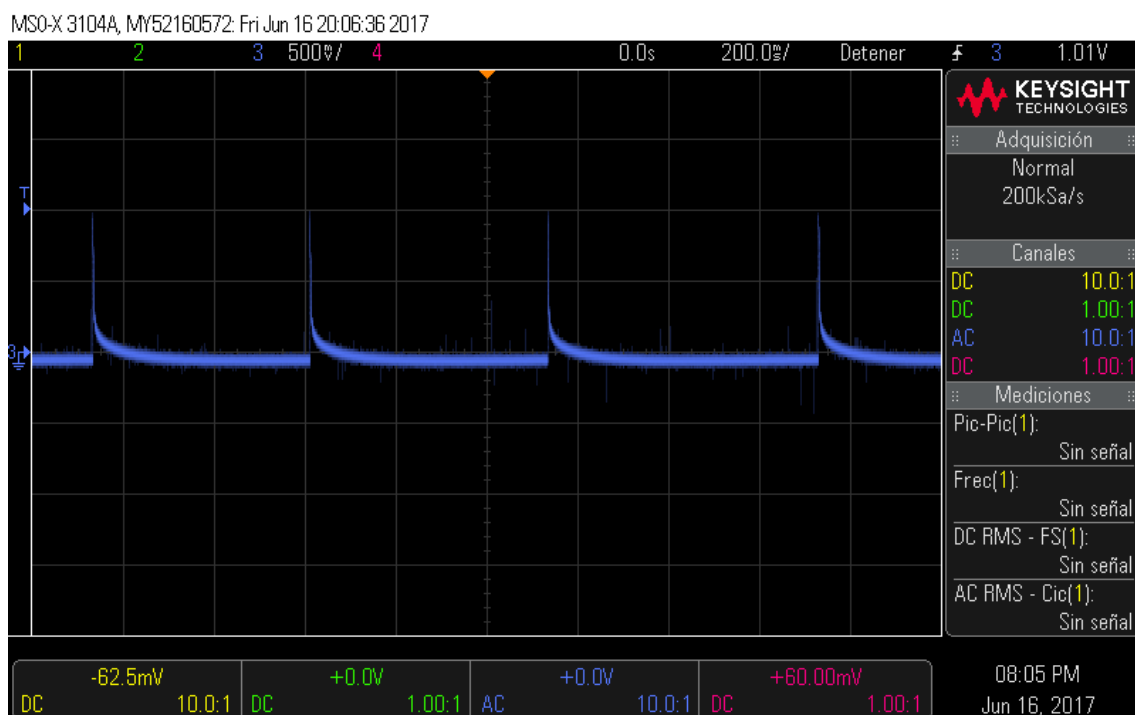
En la **Figura 5-3**, se muestra en color verde la señal a través de los pines PZ1 y PZ2 del *Demo Circuit 1459B-A* que proviene del *Mide Vulture V22B*, en color rosa la señal entre el pin VIN y GND y en color azul la señal entre VOUT y GND.



**Figura 5-3: Señal a través de PZ1 y PZ2, VIN y GND, VOUT Y GND**

Tal y como se puede observar una vez la señal entre PZ1 y PZ2 es rectificadora por el puente de diodos de onda completa, llega al pin VIN una señal de 5.63V, más que necesaria para que el regulador Buck se active y ofrezca a su salida una señal de  $V_{OUT}=3.6V$ .

En este punto en el que se consigue obtener una tensión de salida regulada, se comprobó que esa energía eléctrica era aprovechable por un dispositivo electrónico mediante la conexión de un diodo LED a la salida para observar que emitía luz. Con una corriente de salida en el pin VOUT de hasta 100mA y una tensión de  $V_{OUT}=3.58-3.61$  se observó que el LED parpadeaba, tal y como se muestra analizando la señal a través de sus pines en la **Figura 5-4**:



**Figura 5-4: Parpadeo del Diodo LED**

De este modo se comprobó que a través de la energía mecánica que proviene de las vibraciones se puede obtener energía eléctrica aprovechable por dispositivos electrónicos mediante el efecto piezoeléctrico.

Uno de los objetivos a la hora de realizar el sistema experimental era este mismo, ser capaces de transformar la energía mecánica de las vibraciones en energía eléctrica.

Otro de los objetivos era el poder entender como vibraciones de distinta amplitud y frecuencia afectaba a la transducción piezoeléctrica y comprobar el fenómeno de resonancia cuando la frecuencia de excitación entrara en el ancho de banda de resonancia del material piezoeléctrico, que para el *Mide Vulture V22B* rondaba los 250Hz, y de este modo ser capaces de entender mejor el fenómeno piezoeléctrico.

Para ello se alimentó el motor con tensiones comprendidas entre los 0V y 2V y utilizaron 3 piezas de distinto peso colocadas en su eje para variar la amplitud de las vibraciones que su funcionamiento generaba, mostradas en la **Figura 4-6**, donde se observa una pieza de plástico (en adelante pieza nº1), otra pieza de latón de poco tamaño (en adelante pieza nº2) y otra pieza de latón de mayor tamaño (en adelante pieza nº3). Con todas estas posibles excitaciones del sistema experimental se obtuvieron los valores eficaces de tensión continua (DC-RMS) y de tensión alterna (AC-RMS), la frecuencia promedio de la señal (no es periódica) y el valor de tensión pico-pico analizando la señal obtenida a través de los pines PZ1 y PZ2 del *Demo Circuit 1459B-A* una vez conectado el *Mide Vulture V22B*.

Un hecho a tener en cuenta es que esta frecuencia calculada por el osciloscopio no corresponde con la frecuencia propia de las vibraciones, debido al acople producido entre el transductor la estructura que genera vibraciones y el propio desplazamiento vertical producido en el transductor por las vibraciones, pero si ayuda a entender un poco mejor las relaciones entre la excitación y la energía eléctrica obtenida.

Para poder caracterizar las vibraciones en frecuencia se necesitaría el uso de un acelerómetro piezoeléctrico, capturando la información y efectuando una FFT para extraer los armónicos fundamentales. No obstante, por presupuesto no se pudo obtener uno para estudiar estas vibraciones y entender mejor las medidas realizadas para poner establecer una relación más correcta entre ellas.

Con estos valores analizados se construyeron las siguientes tablas:

<b>Vmotor(V)</b>	<b>Frec(Hz)</b>	<b>Vpp(V)</b>	<b>DC-RMS(V)</b>	<b>AC-RMS(V)</b>
<b>0.8</b>	120	2.2	0.279	0.242
<b>0.9</b>	92	1.3	0.216	0.206
<b>1</b>	102	1.5	0.255	0.231
<b>1.1</b>	117	1.4	0.263	0.243
<b>1.2</b>	127	1.5	0.340	0.300
<b>1.3</b>	139	3.8	0.400	0.344
<b>1.4</b>	143	1.8	0.417	0.360
<b>1.5</b>	144	5	0.523	0.405
<b>1.6</b>	156	5.1	1	0.735
<b>1.7</b>	158	4.5	1	0.707
<b>1.8</b>	174	6.6	1	0.703
<b>1.9</b>	184	6.4	1.91	1.32
<b>2</b>	190	6.5	2	1.5

**Tabla 5-1: Medidas con pieza n°1**

<b>Vmotor(V)</b>	<b>Frec(Hz)</b>	<b>Vpp(V)</b>	<b>DC-RMS(V)</b>	<b>AC-RMS(V)</b>
<b>0.8</b>	60	2.2	0.748	0.506
<b>0.9</b>	64	2.3	0.783	0.565
<b>1</b>	74	2.3	0.831	0.619
<b>1.1</b>	79	2.5	0.912	0.693
<b>1.2</b>	83	2.8	1	0.789
<b>1.3</b>	90	3.2	1.56	1.045
<b>1.4</b>	100	4.3	1.89	1.24
<b>1.5</b>	105	4.9	2.34	1.36
<b>1.6</b>	109	5.5	2.62	1.68
<b>1.7</b>	113	5.8	2.71	1.69
<b>1.8</b>	121	6	2.86	1.71
<b>1.9</b>	125	6.1	2.92	1.80
<b>2</b>	129	6.3	3.1	2

**Tabla 5-2: Medidas con pieza n°2**

Vmotor(V)	Frec(Hz)	Vpp(V)	DC-RMS(V)	AC-RMS(V)
0.8	64	3.6	1.03	0.700
0.9	68.9	3.4	1.06	0.711
1	71.2	3.5	1.11	0.736
1.1	80	3.7	1.17	0.805
1.2	87.3	3.8	1.21	0.850
1.3	95	4	1.27	0.866
1.4	116.2	4.2	1.32	0.9
1.5	120	4.4	1.39	1
1.6	127	4.9	1.52	1.15
1.7	135	5.2	1.71	1.19
1.8	140	5.6	1.94	1.3
1.9	152	6	2.08	1.4
2	163	6.4	2.62	1.6

**Tabla 5-3: Medidas con pieza n°3**

Para comprobar la veracidad de estas medias se repitió el experimento en diferentes ocasiones obteniéndose resultados que variaban completamente de una medición a otra. Esto puede ser debido a que un ligero cambio en la colocación del motor, en la colocación de la mordaza que sujeta el transductor o un desplazamiento en la colocación del transductor hará que los resultados varíen completamente. Al ser un sistema experimental con el que se pretende adquirir un conocimiento medio sobre el *piezoelectric energy harvesting*, mediante el análisis de los resultados obtenidos a través de una batería de excitaciones de prueba y no un sistema fijo que recoja vibraciones ambientales comunes y las convierta para alimentar un dispositivo en concreto, hace que con esta variación en las medidas, unido al hecho de no poder caracterizar correctamente las vibraciones, sea prácticamente imposible parametrizar los resultados y establecer una relación veraz entre excitación de entrada y señal obtenida a la salida.

A pesar de esto, y para estas medidas en particular, sí se puede extraer cierta información de ellas.

El hecho de ampliar la amplitud en las vibraciones ha hecho que con la misma alimentación del motor se pueda obtener unos valores de tensión eficaces mayores, y una disminución ligera de los valores de frecuencia de la señal resultante, pero en rangos similares todos ellos alejados de los aproximadamente 250Hz de frecuencia de resonancia del transductor piezoeléctrico empleado, por lo que no es un cambio notable.

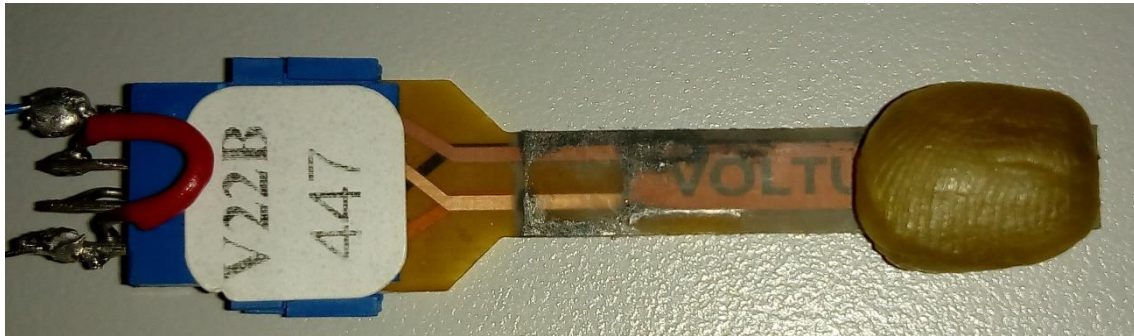
Suponiendo que la medida de frecuencia que nos da el osciloscopio de la señal a través de PZ1 y PZ2 se asemeja con la frecuencia propia predominante de la excitación del sistema, se puede observar que todos estos valores se alejan de los 250Hz de la frecuencia de resonancia del material, lo que resulta en que no se pueda generar suficiente energía eléctrica como para que el *Demo Circuit 1459B-A* entre en regulación.

No obstante, ampliando la tensión del motor más allá de los 2V si se consiguió una señal eléctrica suficiente como para superar el mínimo de tensión en VIN para que el *Demo Circuit 1459B-A* entrase en regulación. Pero como se ha comentado anteriormente, más allá de la alimentación con la que se ha realizado las medidas el sistema experimental presenta un comportamiento muy inestable.



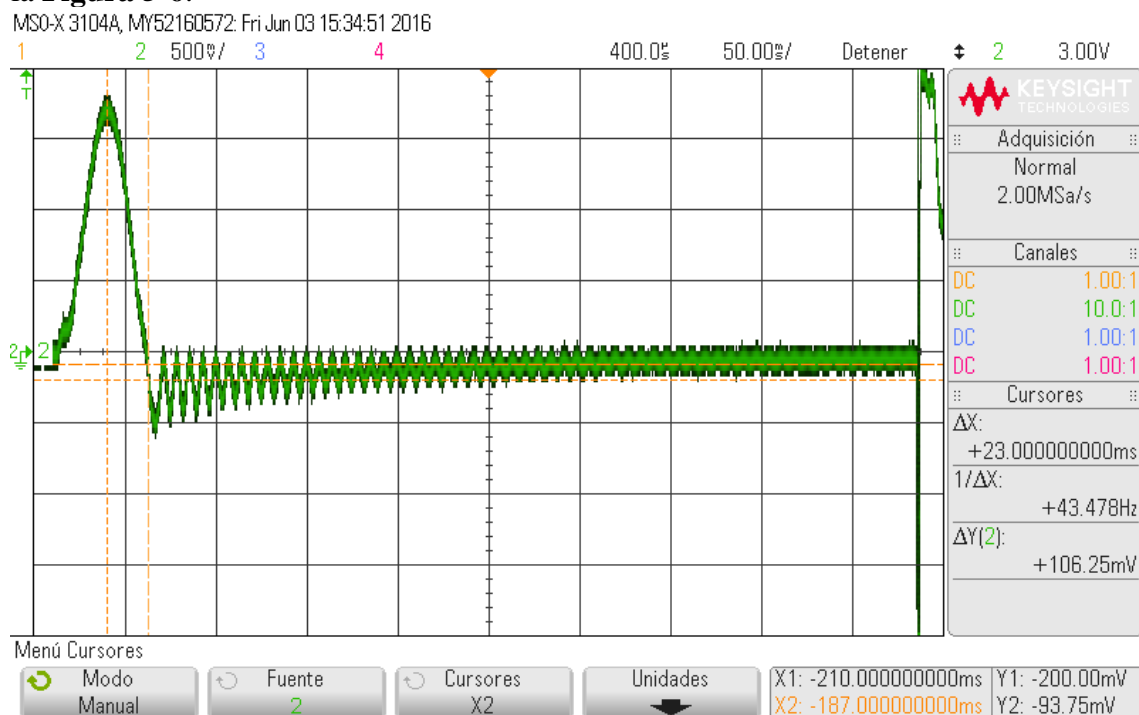
Por ello, y tal como se detalló en el apartado 2, para poder disminuir la frecuencia de resonancia del *Mide Volture V22B* se debe añadir a su extremo una pequeña masa. Cabe destacar que con una misma masa de un cierto peso, cuanto más alejada se coloque de la *clamp line* menor será la frecuencia de resonancia resultante.

Como no se trabaja en este TFG con un sistema fijo, se debe añadir una masa que se pueda remover con facilidad y a su vez quede correctamente fijada al transductor piezoeléctrico. Para ello se ha utilizado un pequeño trozo de cera de abeja y se ha situado al extremo del *Mide Volture V22B*, tal y como se muestra en la **Figura 5-5**:



**Figura 5-5: Cera de abeja sujeta al Mide Volture V22B**

Una vez ha sido correctamente colocada, se procedió a intentar medir de manera aproximada la frecuencia de resonancia resultante. Para medir esta frecuencia, se excitó al *Mide Volture V22B* con un pequeño impulso mediante un ligero golpe con el dedo índice y se midió la frecuencia de la onda cuando esta decrece de manera aproximada, tal y como se muestra en la **Figura 5-6**:



**Figura 5-6: Frecuencia de resonancia con la cera de abeja sujeta al Mide Volture V22B**

Tal y como se muestra la nueva frecuencia de resonancia se encontraría en torno a los 44 Hz aproximadamente. Se procedió de la misma manera de nuevo y la nueva frecuencia medida resultó estar en torno a los 100Hz. Se realizaron varias medidas de este tipo, que sin ser



reproducibles, se encontraban en el rango comprendido entre 50-110Hz, por lo que se asumió que el objetivo de reducir la frecuencia de resonancia del *Mide Volture V22B* se había cumplido.

Este mismo hecho se comprobó midiendo la frecuencia de resonancia del *Mide Volture V22B* sin la masa añadida sabiendo que tendría que salir en torno a los 250Hz. La primera prueba resultó en una frecuencia de resonancia de 218Hz y la segunda en 273Hz.

Una vez comprobada la nueva frecuencia de resonancia y teniendo la pequeña masa de cera correctamente fijada al *Mide Volture V22B*, se extrajeron las mismas medidas que en las 3 tablas comentadas anteriormente. Los resultados obtenidos fueron los mostrados en las siguientes tablas:

<b>Vmotor(V)</b>	<b>Frec(Hz)</b>	<b>Vpp(V)</b>	<b>DC-RMS(V)</b>	<b>AC-RMS(V)</b>
<b>0.8</b>	77	4.1	0.958	0.762
<b>0.9</b>	94	4.6	1.66	1.13
<b>1</b>	107	6.4	2.84	1.8
<b>1.1</b>	115	9.3	4.85	2.865
<b>1.2</b>	124	13.6	7.65	4.38
<b>1.3</b>	134	18.8	10.29	6.034
<b>1.4</b>	144	22.6	11.5	7.45
<b>1.5</b>	150	22.8	11.7	8.1
<b>1.6</b>	161	22.8	11.7	8.4
<b>1.7</b>	166	22.8	11.7	8.5
<b>1.8</b>	175	22.8	12.05	8.8
<b>1.9</b>	188	22.8	12.54	9.1
<b>2</b>	190	22.8	12.56	9.1

**Tabla 5-4: Medidas con pieza n°1 y masa**

<b>Vmotor(V)</b>	<b>Frec(Hz)</b>	<b>Vpp(V)</b>	<b>DC-RMS(V)</b>	<b>AC-RMS(V)</b>
<b>0.8</b>	64	9.5	2.55	2.54
<b>0.9</b>	64	10.2	2.5	2.5
<b>1</b>	70.6	12.1	2.9	2.9
<b>1.1</b>	78.2	13	5.81	3.22
<b>1.2</b>	79	15.7	6.45	3.52
<b>1.3</b>	100	22.6	9	6
<b>1.4</b>	107	22.4	8.56	6.68
<b>1.5</b>	110	22.4	8.77	6.73
<b>1.6</b>	114	22.4	9	6.96
<b>1.7</b>	126	22.4	11	7
<b>1.8</b>	126	22.4	11.53	7.3
<b>1.9</b>	131	22.6	11.43	7.438
<b>2</b>	132	22.6	10.69	7.462

**Tabla 5-5: Medidas con pieza n°2 y masa**

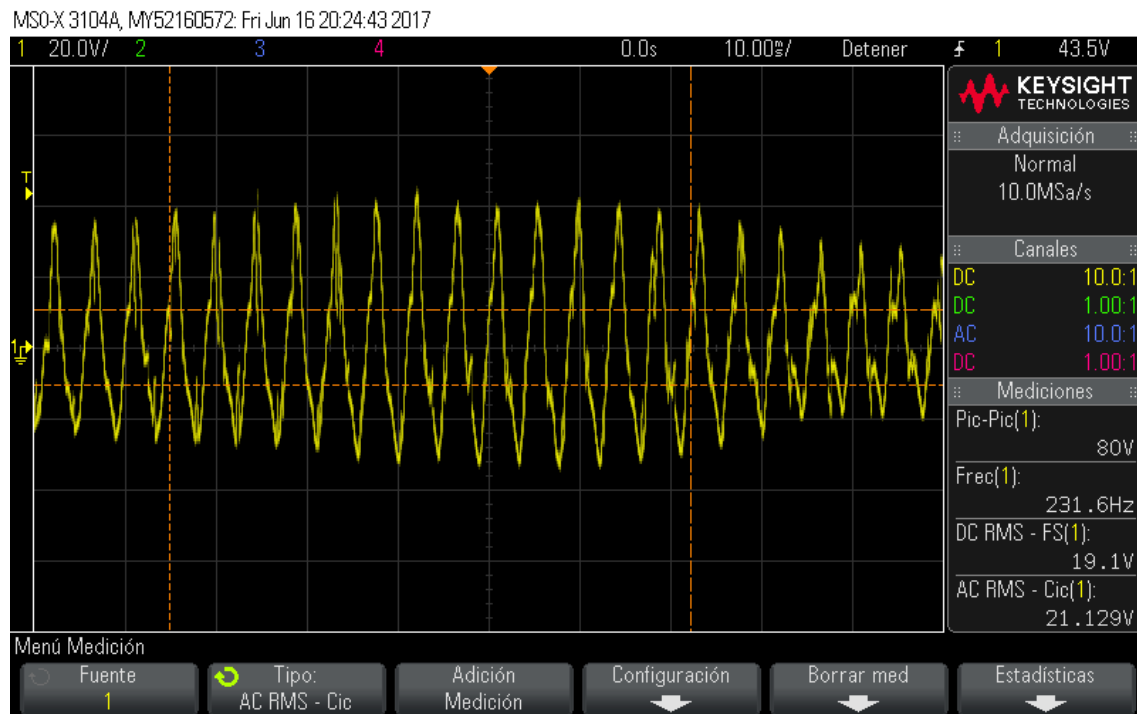
Vmotor(V)	Frec(Hz)	Vpp(V)	DC-RMS(V)	AC-RMS(V)
0.8	71	6.1	2.30	1.69
0.9	74.71	6.8	2.79	2.02
1	74.33	7.8	3.73	2.5
1.1	89.72	14.3	6.76	4.3
1.2	94.7	17	7.54	5.08
1.3	103	16.3	7.8	4.9
1.4	105	19	8.36	5.37
1.5	114	20.7	9.10	5.76
1.6	115	21.2	8.41	6.3
1.7	117	21.9	9.84	6.54
1.8	117	19.7	10.34	5.4
1.9	118	20	10.92	5.67
2	119	20.7	11.29	5.98

**Tabla 5-6: Medidas con pieza n°3 y masa**

Como se puede comprobar y tal como se ha comentado antes, las medidas en la frecuencia de salida de la señal difieren a las medidas mostradas en las tablas anteriores con la misma excitación.

No obstante, y en el caso de que estas medidas de frecuencia se asemejasen con la frecuencia predominante en las vibraciones se puede observar que el hecho de haber reducido la frecuencia de resonancia del *Mide Vulture V22B* con la pequeña masa de cera ha provocado que se obtenga a su salida una señal eléctrica mucho más fuerte que sin esta masa, dado que se ha aproximado el ancho de banda de las vibraciones a la nueva frecuencia de resonancia. Para todas estas medidas y a partir de los 3.7V DC-RMS se ha conseguido mantener una tensión regulada a la salida del *Demo Circuit 1459B-A*.

Por último, se examinó la salida del *Mide Vulture V22B* sin ser conectada a una carga para verificar la funcionalidad. Dado que se dispone de muchas maneras de excitar al sistema, se ha hecho un barrido de excitaciones hasta encontrar la excitación que ha producido una señal más fuerte a la salida del *Mide Vulture V22B*, mostrada en la **Figura 5-7**:



**Figura 5-7: Señal de salida del Mide Volture V22B**

La figura muestra como el voltaje a la salida del *Mide Volture V22B* varía con el desplazamiento vertical, de modo que produce un voltaje positivo con el primer desplazamiento vertical hacia arriba y un voltaje idéntico pero negativo a su vuelta, creando la señal de voltaje AC mostrada en la **Figura 5-7**.



## 6 Conclusiones y trabajo futuro

---

### 6.1 Conclusiones

Una vez finalizado este TFG, se puede concluir que se han cumplido los objetivos iniciales en su desarrollo.

El objetivo principal de este TFG era adquirir un conocimiento medio en el campo de los *Piezoelectric Energy Harvesters* mediante el estudio del marco teórico y el desarrollo y análisis de un caso práctico.

Mediante el marco teórico se han adquirido conocimientos sobre:

- Importancia y concepto de *Energy Harvesting*
- Principio de transducción piezoeléctrica
- Modelos equivalentes y modos de operación
- Importancia del fenómeno de resonancia
- Circuitería de acondicionamiento
- Literatura desarrollada en el campo

Mediante el desarrollo de un caso práctico se han adquirido conocimientos sobre:

- Modelos comerciales de PEH y su funcionamiento
- Modelos comerciales de circuitería de acondicionamiento y su funcionamiento
- Generación de vibraciones de distintas amplitudes y frecuencias
- Análisis de requerimientos y puesta en práctica
- Señales resultantes del fenómeno piezoeléctrico
- Ajuste frecuencial de resonancias

Por otro lado, con el sistema experimental desarrollado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La puesta en práctica del sistema experimental ha conllevado una serie de dificultades como la inestabilidad del sistema final y la difícil parametrización de resultados que conlleva.
- El presupuesto ha impedido llevar a cabo un análisis más exhaustivo y veraz.
- Se ha podido observar completamente y analizar cómo con distintas excitaciones mecánicas se generan las diferentes señales eléctricas.
- Se ha comprobado cómo se puede extraer energía eléctrica aprovechable a partir de vibraciones
- Se ha comprobado la importancia de la caracterización de las vibraciones para poder extraer la mayor cantidad de energía de los transductores piezoeléctricos.
- Se ha comprobado cómo se puede variar la frecuencia de resonancia de un transductor piezoeléctrico para adaptarse a la excitación mecánica.

- Con los conocimientos adquiridos se podría iniciar un desarrollo que alimentase un dispositivo electrónico mediante vibraciones presentes en nuestro día a día en el medio ambiente.

## **6.2 Trabajo futuro**

Con el objetivo de realizar un análisis más profundo de la tecnología involucrada en el campo de los PEHs se propone:

- Llevar a cabo un análisis más exhaustivo mediante la adquisición de un generador controlable de vibraciones de distinta amplitud y frecuencia.
- Mejorar el sistema experimental desarrollado en este TFG haciendo que tenga un comportamiento más estable y que las medidas realizadas se puedan parametrizar.
- Llevar a cabo un desarrollo real mediante la caracterización frecuencial de las vibraciones a recoger como energía mecánica de excitación mediante la adquisición de un acelerómetro piezoeléctrico. Una vez conocidos los armónicos fundamentales en la excitación y mediante el uso del generador de vibraciones ajustar la frecuencia de resonancia del transductor piezoeléctrico empleado a la frecuencia predominante en las vibraciones para extraer una mayor cantidad de energía. Desarrollar la circuitería necesaria para acondicionar la señal extraída del transductor piezoeléctrico para alimentar el dispositivo electrónico objetivo.

## Referencias

---

- [1] R. Calió, U. Bhaskar Rongala, et al., “Piezoelectric Energy Harvesting Solutions”. ISSN 1424-8220, Sensors 2014, 14, 4755-4790
- [2] A. Toprak, “Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges”, American Institute of Physics, 2014
- [3] Francesco Cottone, “Introduction to Vibration Energy Harvesting,” ESIEE Paris, Agosto, 2011
- [4] M. Cruz Acero, J. Estev, “Energía ambiental (energy harvesting),” Instituto de Microelectrónica de Barcelona, IMB-CNM, CSIC, 2012.
- [5] S. Boisseau, G. Despesse and B. Ahmed Seddik, “Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting”, Small-Scale Energy Harvesting, Intech, 2012
- [6] A. Gessow, “Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors,” in Rotorcraft Center, University of Maryland
- [7] H. Staaf, E. Köhler et al. “Modelling and experimental verification of more efficient power harvesting by coupled piezoelectric cantilevers”, Department of Microtechnology and Nanoscience, Chalmers University of Technology, 412 96 Gothenburg, Sweden
- [8] D. Collin, “Piezoelectric Powered LED Street Reflector”, California Polytechnic State University, Spring 2014
- [9] En la web de Smart Materials Corporation, <https://www.smart-material.com/media/Datasheet/EH-Kit-V1.1-web.pdf> , 2012
- [10] En la web de Mide Technology Corporation, “Vulture™ Piezoelectric Energy Harvesters Product Datasheet”, Medford, MA. 2013.
- [11] En la web de Linear Technology, “Demo circuit 1459B quick start guide LTC3588EMSE-1 LTC3588EMSE-2 piezoelectric energy harvesting power supply,” Demo circuit 1459B Product Datasheet, Milipitas, CA: Linear Technology 2010.
- [12] En la web de Linear Technology, “Nanopower Energy Harvesting Power Supply LTC3588-1,”, Milipitas, CA. 2010.





## **Glosario**

---

EH	Energy Harvesting
FFT	Fast Fourier Transform
MEMS	Microelectromechanical Systems
PEH	Piezoelectric Energy Harvester
PEHs	Piezoelectric Energy Harvesters
UVLO	Undervoltage Lockout
WSN	Wireless Sensor Networks

